

Dédicace :

A mes chers parents,

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. C'est grâce à vos encouragements que j'ai choisi cette voie. J'espère avoir été à la hauteur de vos attentes, je vous aime plus que tout.

A mes chèrs amis,

Pour tous les moments de joie et de galère que nous avons vécus ensemble, tous les obstacles que nous avons pu surmonter, je vous remercie d'avoir toujours été à mes coté, votre amitié m'est très chère.

A tous mes amis,

Je dédie ce travail.



Remerciements

Au terme de ce stage, je remercie tout d'abord **M. EL AMRI Salah** le directeur du projet 'traitement GANTOUR de Benguerir' de m'avoir accordé l'opportunité de passer mon stage au sein de son honorable direction.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **M. AZOUKENNI Khalid** l'encadrant externe de stage, de m'avoir accepté au sein de leur équipe, et pour son aide immense, son encadrement de haute qualité, et de sa serviabilité, son expertise qui m'a permis d'acquérir autant au sein du Groupe Office Chérifien des Phosphates (OCP).

Mes sincères remerciements à mes Professeurs et encadrants **Prof. SADOK Abdelaziz et Prof. KHOMSI Driss** qui m'ont accompagné pour la réalisation de ce projet, et qui ont toujours été là pour me conseiller et m'aider à bien mener le travail.

Je saisis cette occasion également, pour remercier les encadres ingénieurs OCP Benguerir, **M. LAMRABET Mohamed** et **M. CHAROUIT Mustapha** pour leur assistance continue et leur serviabilité tout au long de la période de mon stage, leur disponibilité permanente et leur aide précieuse.

Spécial remerciement à l'ensemble du personnel de la direction 'Développement Mine', ainsi que toute personne ayant fait de ce stage une très belle expérience.

Je remercie également le corps administratif de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, et en particulier du département civil Pour leurs efforts accordés.



Résumé

La construction de la nouvelle laverie de Benguérir entre dans la perception d'augmenter la production des phosphates afin de répondre aux attentes des marchés internationaux, la laverie en phase d'exécution est constituée de :

- Station de lavage
- Station de flottation
- Décanteur
- Digue d'épandage

Le projet étudié au sein du groupe OCP consiste à étudier l'écoulement de la boue à l'intérieur de la digue d'épandage afin d'optimiser le taux de stockage de solide et le taux de récupération d'eau.

Pour ce faire, une caractérisation du produit boue est nécessaire, afin de modéliser son comportement à l'intérieur de la digue et évaluer le taux de récupération d'eau pour plusieurs scenarios (agir sur la pente du bassin, introduire des chicanes…).

Le but est de trouver la configuration optimale du bassin en terme de stockage et de récupération d'eau et sortir avec un planning d'utilisation de la digue sans oublier de dimensionner les ouvrages constituants le bassin.



ABSTRACT

The construction of Benguerir's new beneficiation plant is part of the perception of increasing the production of phosphates in order to meet the expectations of the international markets. The beneficiation plant at the execution phase consists of:

- ✓ Wash station
- ✓ Flotation station
- ✓ Thickener
- ✓ Spreading dyke (tailings storage facility)

The project studied within the OCP group consists of studying the flow of sludge inside the spreading dike (tailings storage facility) to optimize the solid storage rate and the water recovery rate.

To do this, a characterization of the sludge product is necessary, in order to model its behavior inside the dike and evaluate the water recovery rate for several scenarios (act on the slope of the basin, introduce baffles ...).

The goal is to find the optimal configuration of the pond in terms of water storage and recovery and to come out with a schedule of use of the dike (tailings storage management) without forgetting to size the structures constituting the tailings storage facility.



ملخص

يعد المشروع الجديد لاستخراج الفوسفاط وتحضيره بابن جرير جزءًا من تصور زيادة إنتاج الفوسفاط من أجل تلبية توقعات الأسواق الدولية، ويمر الفوسفاط بعد استخراجه بالمراحل الاتية:

- ✓ مرحلة الغسل
- ✓ مرحلة التعويم
- ✓ مرحلة الترسيب السريع
- ✓ مرحلة الترسيب الطبيعية

يشمل المشروع الذي تمت دراسته ضمن مجموعة OCP دراسة سلوك مخلفات الفوسفاط داخل الحوض المخزن من أجل تحسين معدل تخزين الصلب ومعدل استرداد المياه.

للقيام بذلك، من الضروري وصف مكونات مخلفات الفوسفاط، من أجل نمذجة سلوكه داخل الحوض وتقييم معدل استرداد المياه للعديد من السيناريوهات (تغيير منحدر الحوض، وإدخال الحواجز...).

الهدف هو العثور على التكوين الأمثل للبركة من حيث التخزين واسترداد المياه والخروج بجدول زمني لاستخدام الحوض دون أن ننسى للتحقق من ثبات الحوض للحالة المثلى.



Sommaire



Liste des figures





Liste des tableaux



Introduction :

La qualité de la roche extraite dans les différents sites du Groupe lui attribue une place privilégiée sur l'échiquier mondial des engrais. La concentration de P_2O_5 dans la roche de phosphate produite au Maroc varie entre 5% et 45%. La concentration moyenne s'élève à 31,5%. Selon les estimations du Groupe, les réserves de Khouribga représentent environ 44% du total des réserves disponibles au Maroc, alors que les réserves des sites de Gantour et Boucraâ représentent respectivement 36% et 2%.

Pour son programme de développement industriel 2008-2025 dont l'ambition est de servir 50% de la demande incrémentale du marché des engrais, le Groupe OCP prévoit de doubler la production de phosphate pour atteindre 57,4 millions de tonnes par an contre 28 millions de tonnes actuellement, d'où la construction de la nouvelle laverie de Benguerir couvrant ainsi une partie du gisement Gantour de capacité 16 Milliards m^3 en matière de phosphate.

Le but derrière cette étude est de trouver la configuration optimale du bassin de rétention de cette nouvelle laverie, en terme de stockage de boue et de récupération d'eau et de sortir avec un planning d'utilisation sur la durée de vie du bassin ainsi que le dimensionnement des ouvrages constituants la digue d'épandage.

Pour ce faire, le premier chapitre concerne une présentation globale des processus de traitement de phosphates dans cette laverie, le deuxième introduit la digue d'épandage, le troisième et le quatrième chapitre contiennent une étude théorique du comportement de la boue à l'intérieur du bassin et une simulation de son écoulement en utilisant un logiciel appelé RIFT TD pour plusieurs scenarios de configuration de la digue afin de trouver le scenario optimal et le planning d'utilisation correspondant. Le dernier chapitre entame le dimensionnement des composantes du bassin, à savoir la stabilité du corps de la digue en utilisant geoslope et la conception des chicanes sur CYPE.



Chapitre I : Présentation de la nouvelle laverie de Benguerir



I. Gisements phosphatés marocains :

Le Maroc est caractérisé par quatre gisements phosphatés, ces derniers sont déposés au niveau des golfs à partir du crétacé supérieur jusqu'à l'éocène, suite à une transgression très importante. Le phosphate déposé est de type sédimentaire sous-marin et présente 75% des réserves mondiales. Ces gisements sont :

- **Bassin D'Oulad Abdoun** : 37,35 Milliards de m^3.
- **Bassin des Gantour**: 15,95 Milliards de m^3.
- **Bassin de Meskala**: 1,11 Milliards de m^3.
- **Bassin Oued Eddahab** : 31,35 Milliards de m^3.

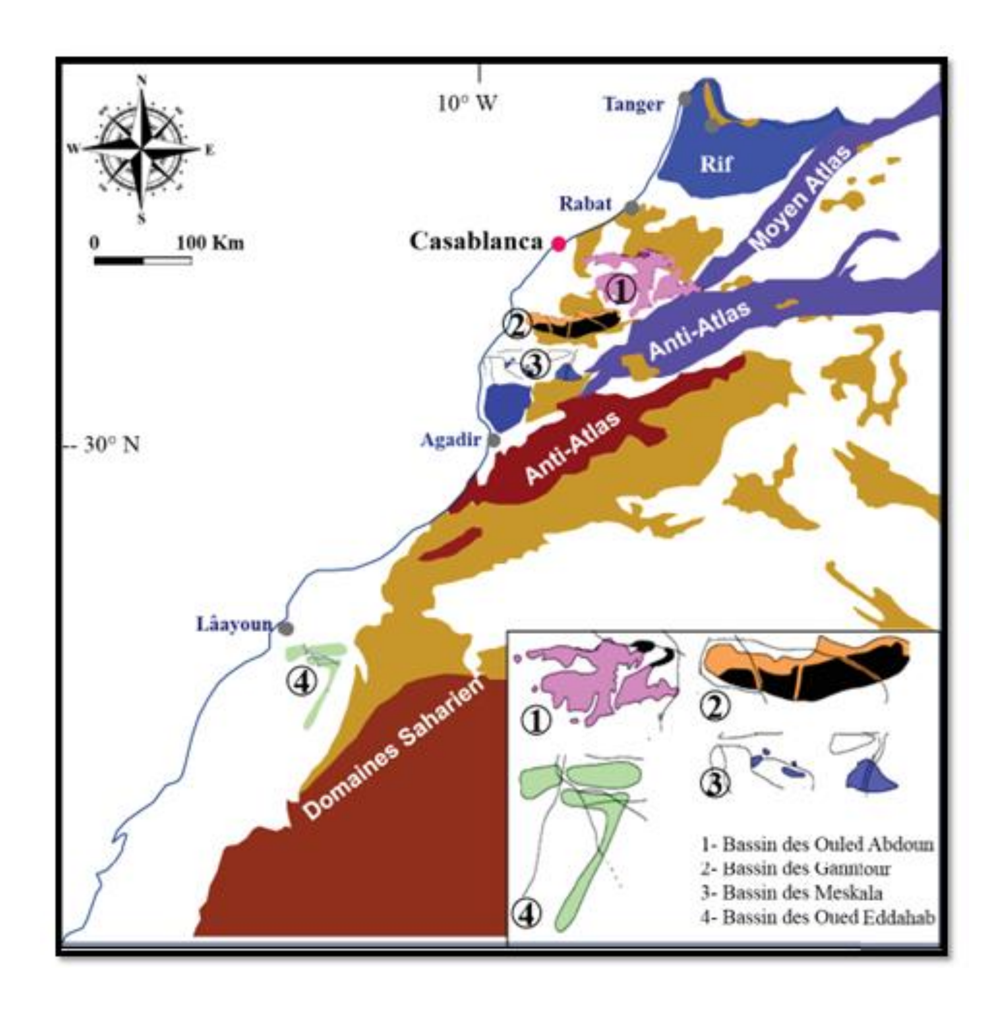


Figure 1: Gisements phosphatés au Maroc

Notre zone d'étude se situe dans le plateau de phosphate des Gantour**,** orienté Est-Ouest, de longueur 120 Km et de largeur de 20Km à 30km, limitée au Nord par le massif paléozoïque de Rehamna, au Sud par le massif ancien des Jbilet , A l'Est par oued Tassaout, (affluent de l'oued Oum-Er-rbia), à l'ouest, les collines jurassiques de mouissate.



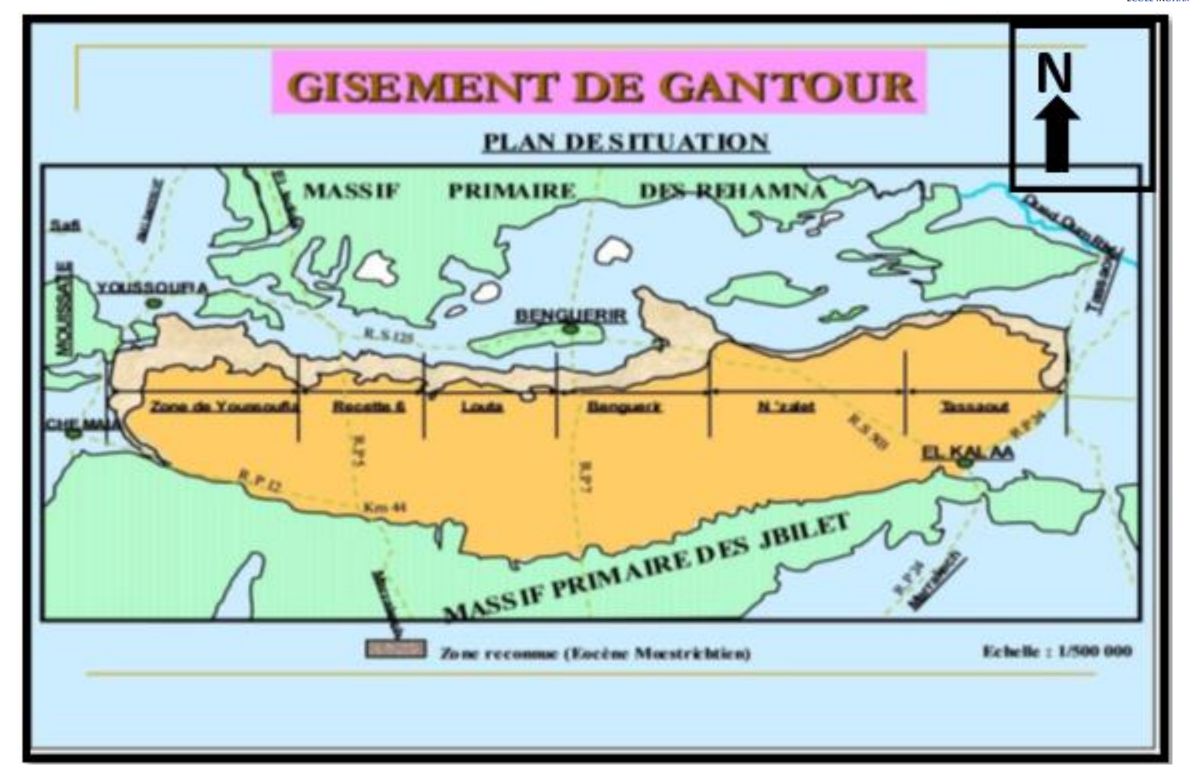
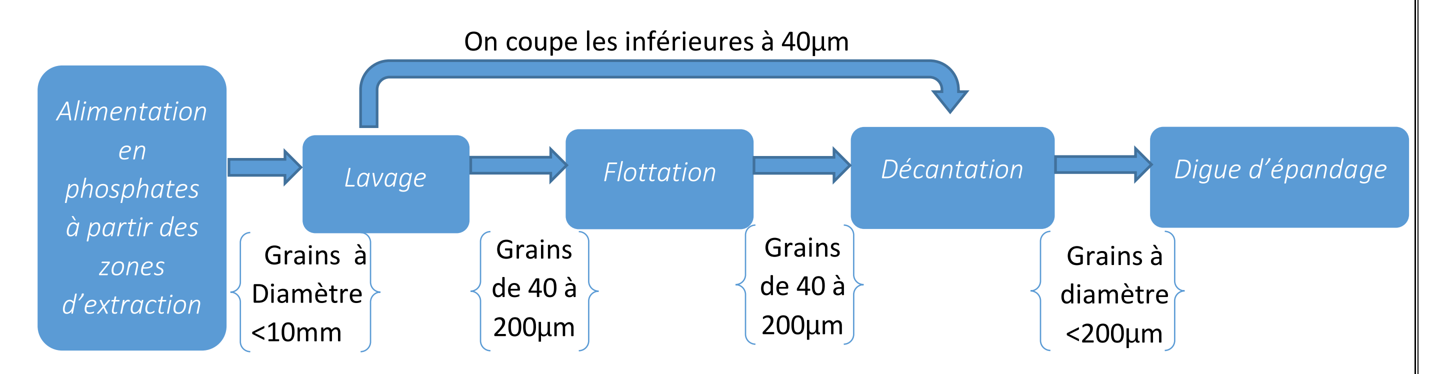


Figure 2: Gisement de GANTOUR

II. Représentation des étapes de traitement des phosphates :



Afin d'avoir une idée sur la richesse en phosphates selon la granulométrie, on prend des échantillons à partir des couches de phosphates, on représente la teneur en BPL en fonction de la taille des grains pour savoir à quel diamètre on doit couper dans la laverie.



Une représentation d'un échantillon de la première couche :

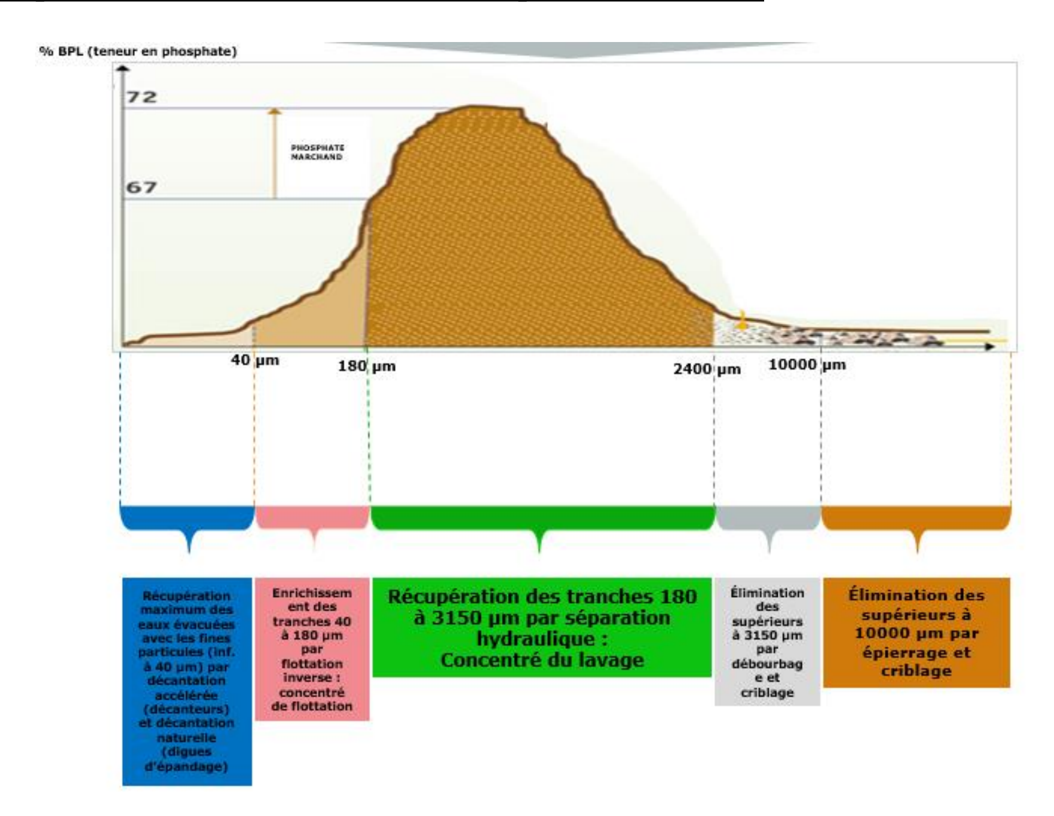


Figure 3: la teneur en BPL (Bone Phosphate of lime) en fonction du diamètre des grains

- **Lavage :**

Pour effectuer ce processus, les grains de diamètre inférieur à 10mm reçues à partir des couches de phosphates en zones d'extraction sont regroupés par taille :

Les particules appartenant à [3150µm ; 10mm] : sont très pauvres en teneur en BPL, c'est pourquoi elles sont mises à terril et stockées sous formes de cavaliers, qui vont être utilisés comme matériaux de construction de la digue d'épandage.

Les particules à diamètre inférieur à 40µm : sont également pauvres en teneur en BPL, et sont dirigées directement vers le décanteur.

Les particules appartenant à [200µm ; 3150µm] : sont riches en BPL (environ 68%) et considérés comme phosphates pures. Après leur lavage, elles sont dirigées directement vers le stock.

Les particules appartenant à [40µm ; 200µm] : sont moyennes en teneur en BPL (environ 45%) et sont dirigées vers le block de flottation pour leur enrichissement en phosphate.



Flottation :

Ce block reçoit les particules en moyenne teneur en BPL, les essais ont montrées qu’ils appartiennent à la gamme [40µm ; 200µm], ce processus a pour but d’enlever les SiO_2 et les MgN et CO_2 afin d’avoir des phosphates pures, ces derniers sont dirigés vers le stock.

Les matières stériles sont dirigées vers le décanteur.

Décantation :

Ce block reçoit les stériles inférieurs à 200µm avec un total de solide égal à 7,42%. Après leur épaississement, on récupère à peu près 80% de l’eau, stocké dans un bassin qui alimente l’usine de production. A la sortie du décanteur, on obtient une boue avec un total de solide égal à 35%, stocké dans la digue d’épandage.

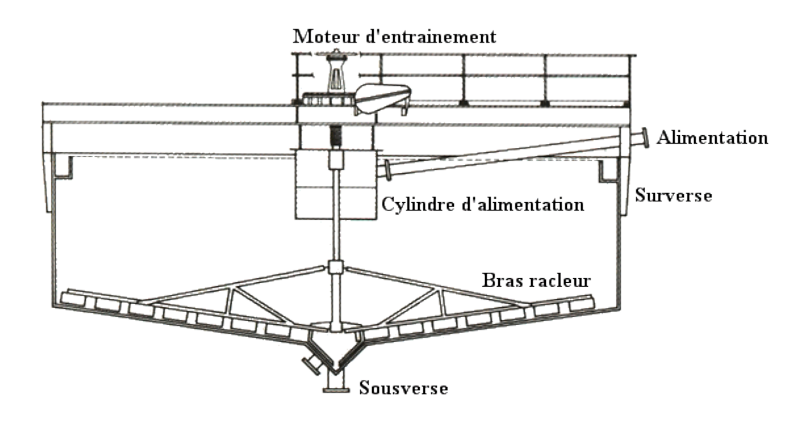


Figure 4: épaississeur de boues

Digue d’épandage :

La digue d’épandage est un bassin rectangulaire étendu (1250x624 m^2) avec une hauteur de 13m, les limites du bassin sont sous forme de digue symétrique de fruits 2.6H/1V (annexe 1.c). Le concept de récupération d’eau est le suivant :

On achemine la boue du décanteur vers la digue, la boue s’écoule le long du bassin en longueur et elle se décante, après un certain moment on obtient une séparation des phases solide- liquide.

Dans l’autre côté du bassin, on installe des clarinettes conduites métalliques qui collectent l’eau flottante et la dirige à travers une tranchée vers le bassin de reprise d’eau. (Voir plans du bassin en annexe 1.c).



Chapitre II : Présentation de la digue d'épandage de la nouvelle laverie de Benguerir



Afin de pouvoir stocker la boue provenant du circuit du lavage de phosphates et en extraire l'eau résiduelle, le projet de la future laverie de BENGUERIR prévoit l'aménagement d'une digue de rétention, dont l'emplacement a fait l'objet d'étude de comparaison technico-économique. Concernant le contexte géographique du projet, la ville de Benguerir se situe à environ 70 Km au Nord de Marrakech et à 57 Km à l'Ouest de la ville d'El Kelaâ des Sraghna.

I. Les variantes du site de la digue :

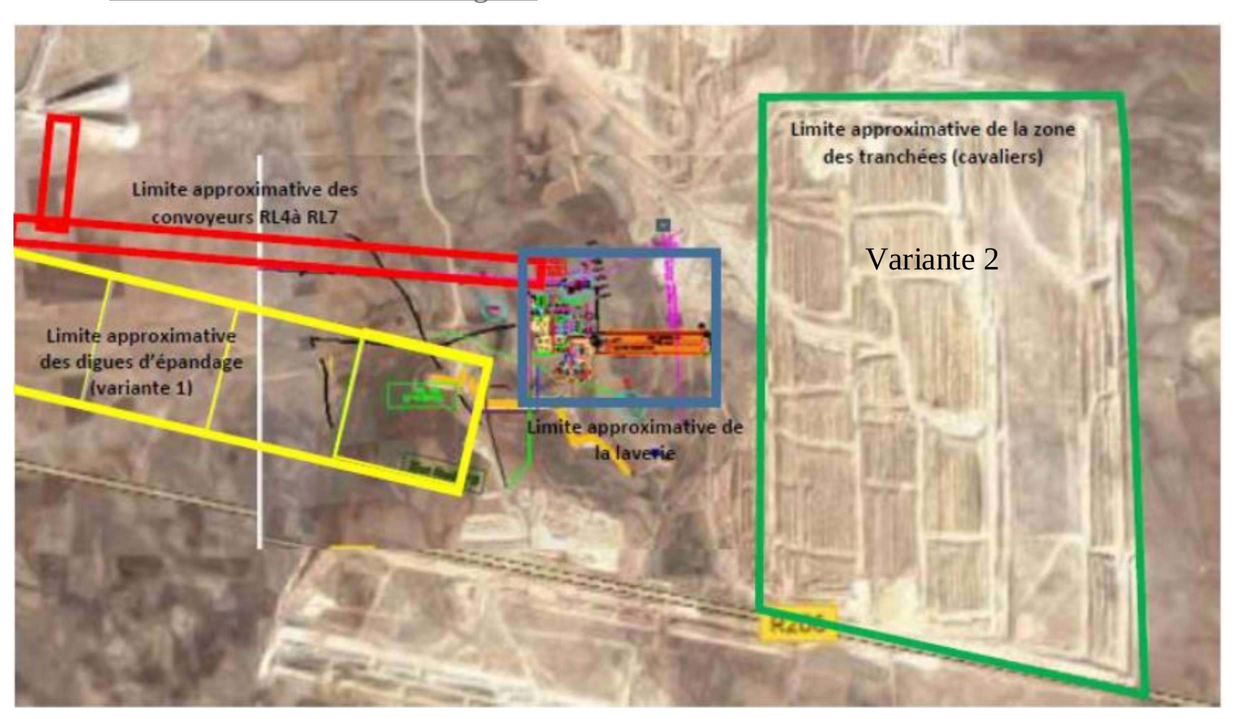


Figure 5: variantes de l'emplacement de la digue

Variante 1 : Afin de pouvoir stocker la boue provenant du circuit de la laverie et en extraire l'eau résiduelle, JESA a prévu initialement, l'aménagement d'une digue de rétention classique (*variante 1 sur photo*), dont l'emplacement proposé est au Sud-Ouest de la laverie (rectangles jaunes), sur un terrain vierge acquis par OCP.

Variante 2 : Succession de digues aménagées au droit des tranchées, creusées lors de l'exploitation minière, moyennant la fermeture des cavaliers par un remblai (rectangle vert). L'étendu de ces digue « en parallèle » est tributaire du volume total de la boue à traiter.

➡ Ce fut l'implantation au niveau de la zone des cavaliers (variante 2) que retiennent le concepteur (JESA) et le Client (OCP) pour le stockage des boues issues du lavage. **Ce choix traduit leur volonté conjointe d'apporter de l'optimisation en termes d'occupation des terrains alloués au stockage de la boue, combinée à la nécessité et l'obligation de**



réhabiliter les anciennes mines exploitées et réduire ainsi l'impact de l'activité minière sur l'environnement.

II. Etude du terrain d'implantation :

1. Topographie :

La topographie de la zone est relativement tabulaire avec une pente quasi-uniforme et régulière qui décroit du Nord vers le Sud, généralement inférieure à 10°. Dans quelques zones réduites, la pente peut dépasser 10°. Le nivellement de la zone se situait globalement entre les cotes 490 et 450 NGM (voir annexe 1.f).

2. Géologie et géotechnique :

Le laboratoire public d'essais et d'études (LPEE) s'est mis sur place pour effectuer des essais in situ afin d'aboutir aux logs stratigraphiques, les profils lithologiques (voir annexe 1.g et 1.h), et les procès-verbaux des essais in-situ. Sans oublier de compléter l'étude par des essais en laboratoire. En effet, les matériaux meubles et rocheux prélevés à partir des cavaliers ont été soumis aux essais de laboratoire suivants :

- ✓ Granulométrie par tamisage.
- ✓ Essai de sédimentométrie
- ✓ Double sédimetométrie
- ✓ Limites d'atterberg
- ✓ Valeur au bleu de méthylène
- ✓ Essai mécanique sur sol (essai triaxial)
- ✓ Essais mécaniques sur roches de type Los Angeles et Micro Deval
- ✓ Essai Proctor
- ✓ Essai Pin hole test

- Matière organiques dans les cavaliers :

Compte tenu des teneurs quasi-nulles en matières organiques (0% < MO < 3 %), on conclut que les remblais analysés sont inorganiques.

- Le site de la future digue et son périmètre environnant montre une relative homogénéité dans la répartition latérale et verticale des faciès traversés.



- La colonne lithologique est marquée par la présence de phosphates gréseux entrecoupés de bancs de calcaires et par une couche de 0.6 à 2.50 m de marne phosphaté jaunâtre.
- Les matériaux des cavaliers sont abondants et majoritairement classées C1B5, C1B6. Ces sols sont généralement réutilisables en remblai selon la classification GTR (Guide des Tracés Routiers).

Sables limono-graveleux avec des gros éléments	C1B5
Limons sablo- graveleux avec des gros éléments	C1B6

Tableau 1: types de matériaux des cavaliers

- **Donc on aura une quantité suffisante des matériaux de construction de bonne qualité à partir des cavaliers.**

III. Choix du type d'ouvrage :

Les variantes envisageables pour la future digue :

- ✓ **Le remblai homogène :** dont le corps principal est constitué d'un seul matériau avec des protections en petit enrochement en aval. L'étanchéité reposera soit sur le corps de la digue (matériau argileux ou limoneux), ou bien sur d'une couche de géo-membrane posée sur géotextile pour la protéger contre le poinçonnement. Le complexe sera ancré en crête et au pied du talus amont de la digue.
- ✓ **Le remblai zoné :** comportant un noyau étanche (épais ou mince) en matériaux argileux ou limoneux, enveloppé par des transitions (filtre/drain), avec des recharges amont et aval en alluvions tout venant.

En se basant sur l'estimation des quantités de fines existantes sur terrain et sur l'étude comparative de cout entre les deux variantes, il s'est avéré raisonnable de retenir un profil de la digue comportant :

- ✓ Un remblai compacté sans tri de matériaux, muni d'un complexe d'étanchéité (géomembrane + géotextile) (voir annexe 1.c et 1.d). En plus de sa fonction protectrice, le géotextile jouera le rôle de filtre synthétique. Un drain-cheminée en matériau drainant extrait de la zone des cavaliers par criblage (élimination des fines**).**



Cette coupe type est valable sur la partie sud de la digue, où sera implanté le système de récupération des eaux.

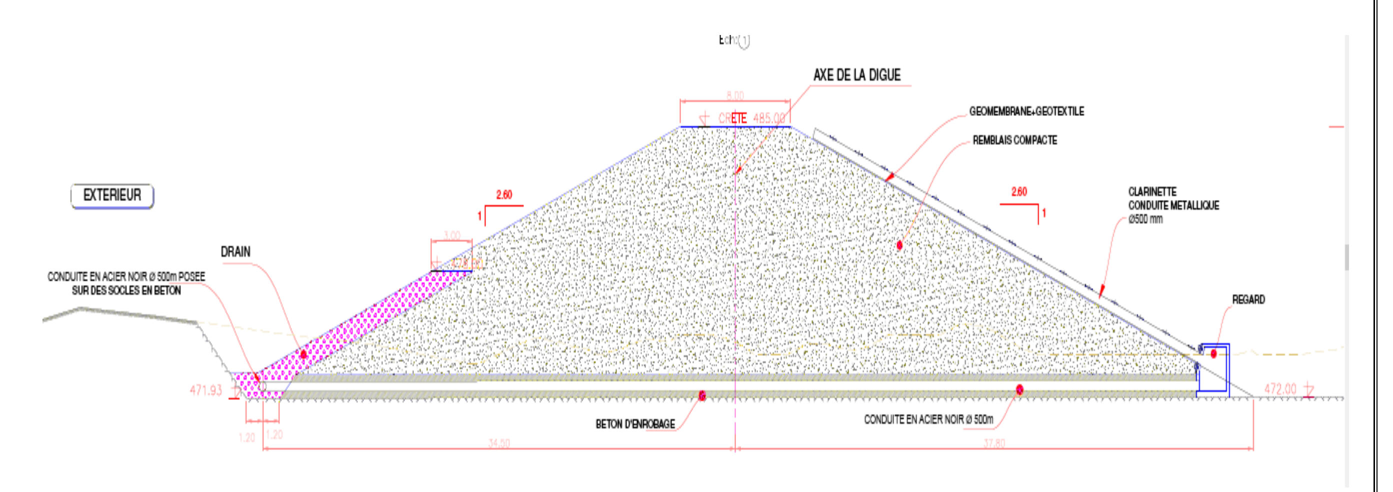


Figure 6: coupe type de la digue au Sud du bassin

La géomembrane offre l'avantage d'empêcher l'infiltration des eaux à travers les remblais. Il est nécessaire de prévoir une évacuation immédiate de toute eau filtrée afin de réduire la percolation à travers les remblais et par conséquent, éviter le développement des pressions interstitielles dedans (risque d'instabilité).

- ✓ Un remblai zoné comportant les matériaux à taux élevé de fines (>35%) sur les premiers cinq mètres. Les remblais à taux de fines réduits seront mis en place sur le reste du corps de la digue.

Cette disposition sera valable sur l'ensemble de la partie centrale et nord de la digue. Les remblais étanches remplaceront la géo-membrane et seront en contact avec les boues en dépôt.

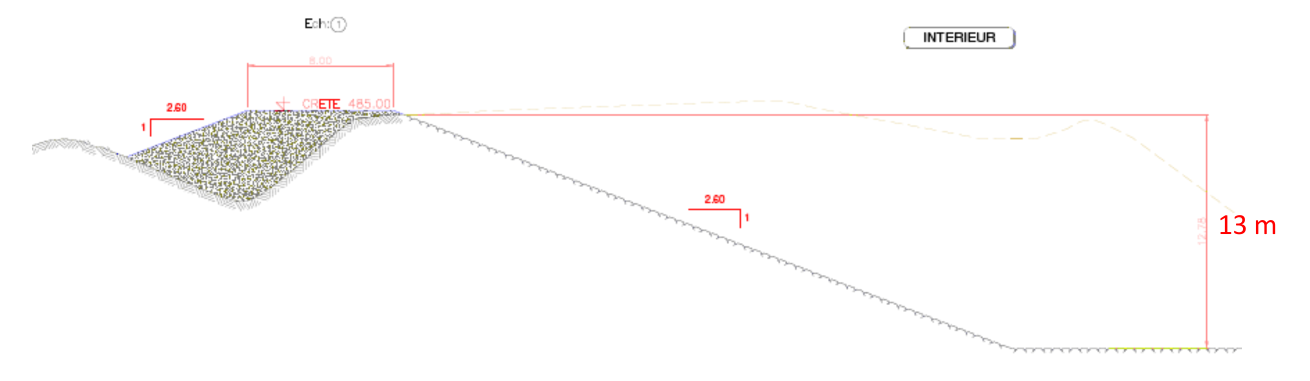


Figure 7: coupe type de la partie centrale et nord de la digue



IV. Mécanisme d'alimentation de la boue et récupération des eaux :

La forme du bassin sera rectangulaire pour prolonger le chemin d'écoulement de la boue et des eaux, favorisant ainsi la décantation des fines et la récupération d'une eau suffisamment claire à l'autre bout du bassin.

En s'inspirant de la technique adaptée sur les digues d'El Merah (MEA), notre bassin sera alimenté par 3 points implantés sur le mur en remblais, la distance entre ces 3 points va être abordée dans la partie simulation sur RIFT TD afin de trouver la bonne disposition qui nous donne une répartition uniforme de la boue.

Quant à la récupération, trois systèmes sont également identifiés sur les digues, à savoir :

- ✓ Cheminées drainantes (constituées d'un ensemble de clarinettes) (voir annexe 1.e)
- ✓ Pompes flottantes (au cas où il y'a de l'eau stagnante)
- ✓ Remblais drainant/ filtrant

Pour la présente digue de Benguerir, le choix est porté sur une combinaison des deux premiers systèmes, avec une amélioration des cheminées consistant à les mettre sur le parement amont de la digue, moyennant une assise en béton (pour l'aménagement de marches d'escalier). Il y'aura 4 points de récupération des eaux.

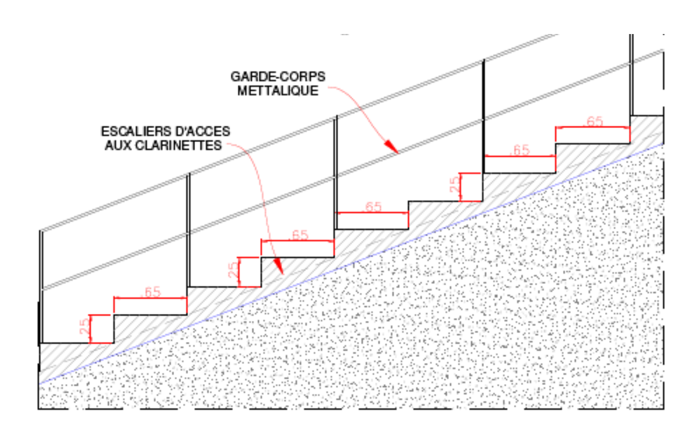


Figure 8: escaliers d'accès aux clarinettes

Les clarinettes seront connectées à leurs bases à une conduite collectrice logée dans une tranchée et enrobée dans le béton, afin d'éviter sa détérioration en raison du tassement des remblais. (Voir figure 12). La conduite collectrice a une pente de 0,9% afin de favoriser l'écoulement de l'eau vers l'extérieur du bassin.



V. Traitement de la fondation :

D'après les essais (Lugeon et Lefranc) réalisés par LPEE sur la fondation, il s'avère que le terrain en total est imperméable (valeur du coefficient de perméabilité est inférieur < 5UL), avec nécessité de traitement par injection non couteux dans quelques zones vu les valeurs proches aux limites de l'imperméabilité. (Voir annexe 1.i)

VI. Choix du dispositif d'auscultation :

En plus de l'inspection visuelle systématique de la digue et son environnement (la crête, les talus et le pied de remblai), consistant en un repérage fuites, suintement, tassement ou fissures, La conception de la digue doit comporter un dispositif d'auscultation.

Le but d'un dispositif d'auscultation est de mesurer des phénomènes ayant une incidence majeure sur le comportement de la digue.

Par sa définition, l'auscultation est constituée d'un ensemble de données quantifiées, fournies par des instruments de mesure, qui permettent de suivre le comportement de l'ouvrage.

Le système d'auscultation de la digue doit être conçu de manière à surveiller les paramètres suivants :

- Les déformations des remblais de la digue pendant la construction et à l'exploitation.
- Les pressions hydrostatiques dans la fondation de la digue.
- Les pressions interstitielles qui se développent au contact du noyau (éventuellement) avec la fondation.
- Les fuites collectées à l'aval de la digue.

Pour ce faire, on prévoit l'installation des piézomètres le long de la digue afin de maitriser les pressions interstitielles développées à cause du contact direct de l'eau avec les cavaliers.

VUE EN PLAN

Cellule piézométrique Esp=360m

X=272650

LIMITE PRESUME DE LA DIGUE

485.00

Esp=250m PIEZOMETRE VOIR DETAIL

a

a

Cellule piézométrique Esp=360m

X=273000

LIMITE FOUILLES

Cellule piézométrique Esp=360m

PIEZOMETRE VOIR DETAIL Esp=250m

PIEZOMETRE VOIR DETAIL Esp=250m

X=273350

485.00

Figure 9: la disposition des piézomètres le long de la digue

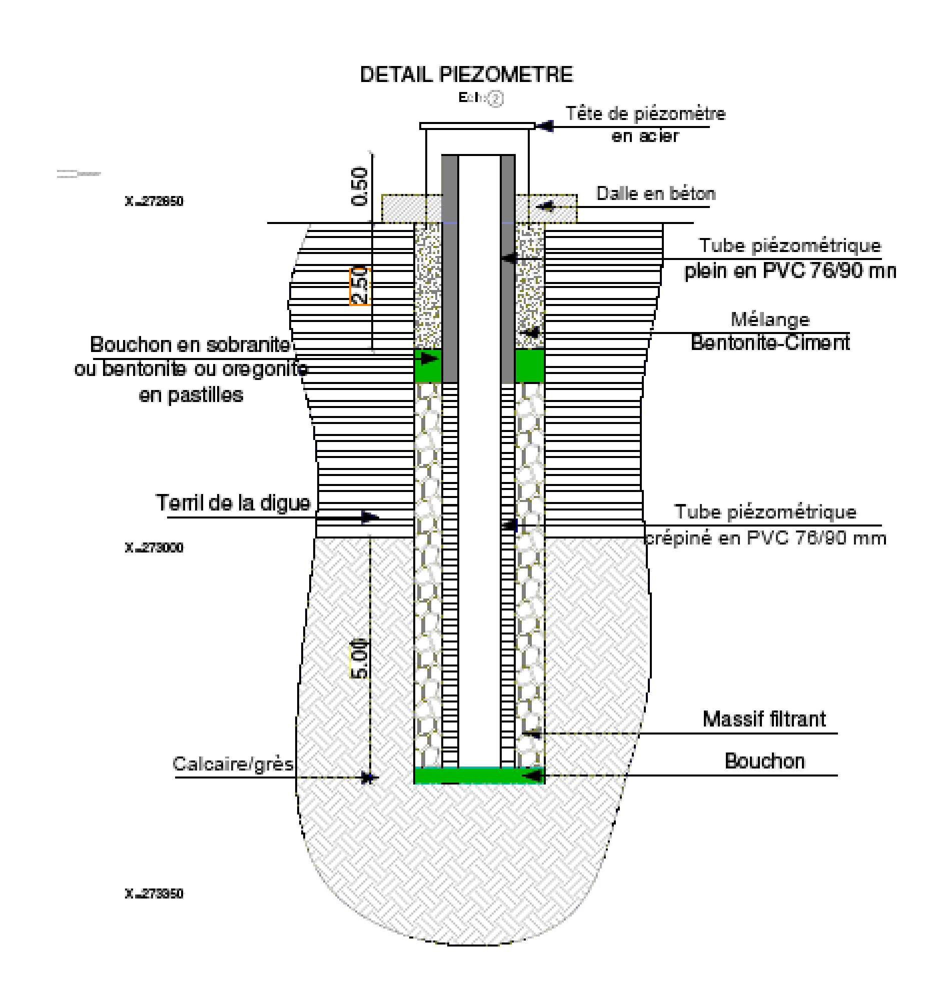


Figure 10: coupe a-a type d'un piézomètre



Chapitre III : Caractérisation de la boue de lavage de phosphate à la sortie de la laverie



A la sortie de la laverie, la boue est dirigée vers un épaississeur par gravité pour récupérer une quantité importante de l'eau claire.

Le laboratoire américain RADISE s'est chargé des essais d'identification des caractéristiques de la boue à l'entrée et à la sortie du décanteur. On va s'intéresser à la composition de la boue à la sortie du décanteur (après épaississement).

I. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme NF P 18-560. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 100µm.

Ainsi le tableau 1 représente les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage.

SIEVE ANALYSIS

Standard Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Cumulative % Passing
No. 4	4.76	**100**
No. 10	2	**99.9**
No. 20	0.84	**99.4**
No. 40	0.42	**98.6**
No. 50	0.297	**97.4**
No. 60	0.25	**95.6**
No. 100	0.149	**80.1**
No. 140	0.105	**65.7**
No. 200	0.074	**54**
Hydrometer Analysis	0.032	**43.84**
	0.021	**40.59**
	0.008	**38.97**
	0.006	**35.72**
	0.004	**32.47**
	0.003	**29.23**
	0.001	**25.98**

Tableau 2: analyse granulométrique par tamisage

A partir des essais de tamisage tableau 2, on trace la courbe qui représente le cumul passant en fonction de diamètre des grains sur une échelle logarithmique, on constate à partir de la



courbe que les particules de diamètre inférieur ou égal à 250µm constituent un pourcentage de 95,6%, c'est-à-dire après lavage des phosphates, on coupe à peu près à 200µm.

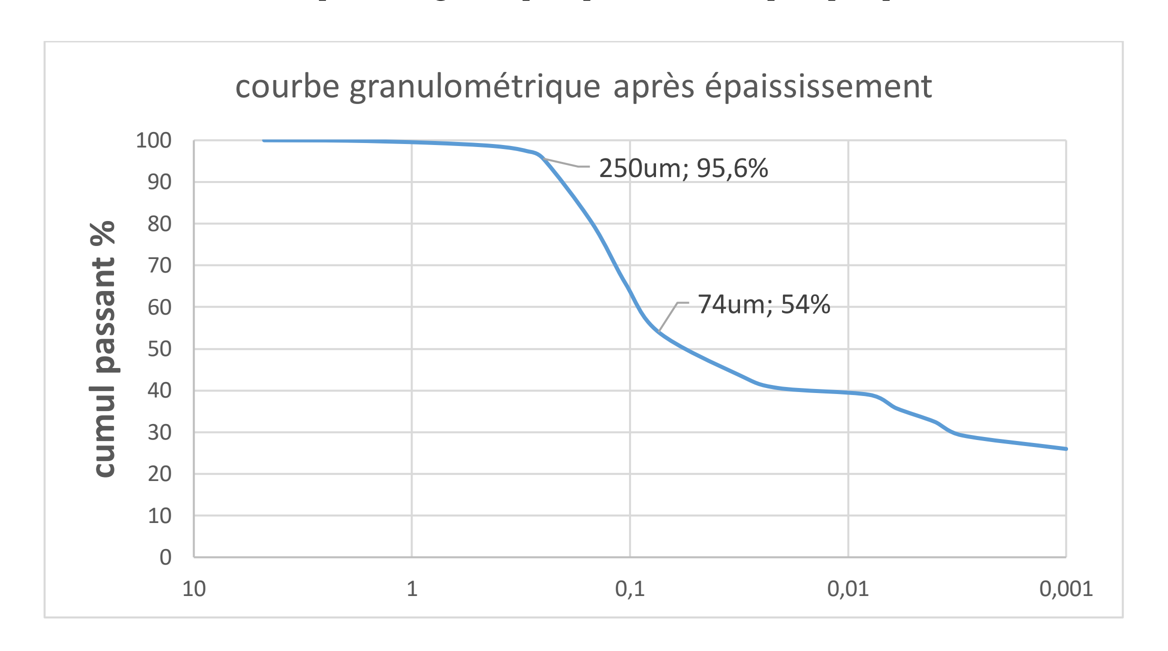


Figure 11: courbe granulométrique de la boue

II. Vitesse de chute :

La vitesse de chute est calculée à partir de la théorie de Kynch :

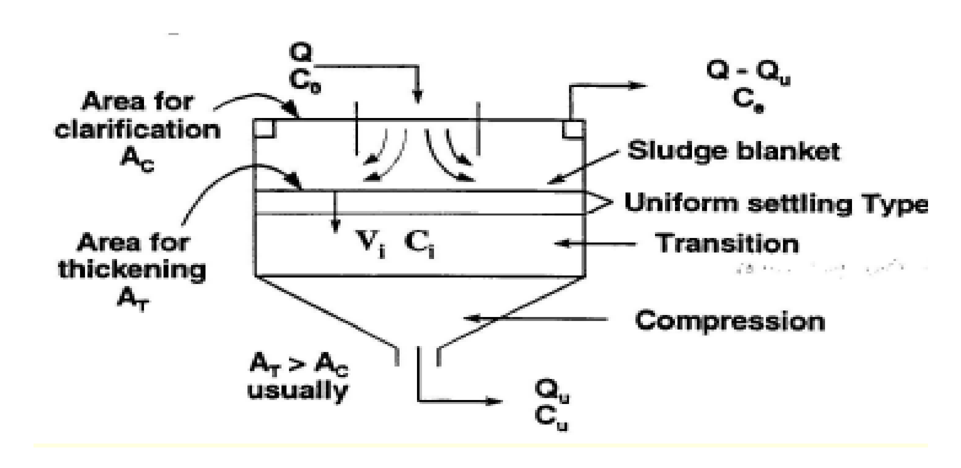


Figure 12: Paramètres caractérisant le décanteur

Q : débit entrant au décanteur (m^3/s)

C_0 : concentration de solide suspendue à l'entrée kg/m^3

C_e : concentration de solide suspendue à la sortie en haut kg/m^3

A_c : surface de clarification en m^2

A_T : surface de décantation en m^2

Q_u : débit de boue sortant du décanteur (m^3/s)

Cu : concentration de solide décantée sortante kg/m^3



V_i : vitesse de chute après épaississement (m/s)

C_i : concentration de solide dans la couche de décantation kg/m^3

U_b : vitesse de pompage de la boue à la sortie (m/s)

$$V_i = {Q \times C_0}/{C_i \times A_T} - U_b$$

En utilisant cette relation, on développe le tableau 3 suivant qui nous donne la vitesse de chute dans l'épaississeur en fonction du diamètre des grains.

SETTLING VELOCITIES

Particle Size (mm)	Cumulative % Passing	Sample Size % Fraction	Settling Velocity (cm/sec)
4.76	100	-	1653.0
2	99.9	0.1	291.8
0.84	99.4	0.5	51.5
0.42	98.6	0.8	12.9
0.297	97.4	1.2	6.4
0.25	95.6	1.8	4.6
0.149	80.1	15.5	1.62
0.105	65.7	14.4	0.80
0.074	54.0	11.7	0.40
0.032	43.84	10.16	0.0747
0.021	40.59	3.25	0.0322
0.008	38.97	1.62	0.0047
0.006	35.72	3.25	0.0026
0.004	32.47	3.25	0.0012
0.003	29.23	3.24	0.0007
0.001	25.98	3.25	0.00007
< 0.001	-	25.98	< 0.00007
		100	

Tableau 3: vitesse de chute en fonction du diamètre des grains

A partir du tableau 2, on trace la courbe représentante la vitesse de chute en fonction du diamètre des grains sur une échelle logarithmique, on constate que la vitesse de chute peut arriver à 2 m/s pour la portion 0,1% de diamètre égal à 2mm.



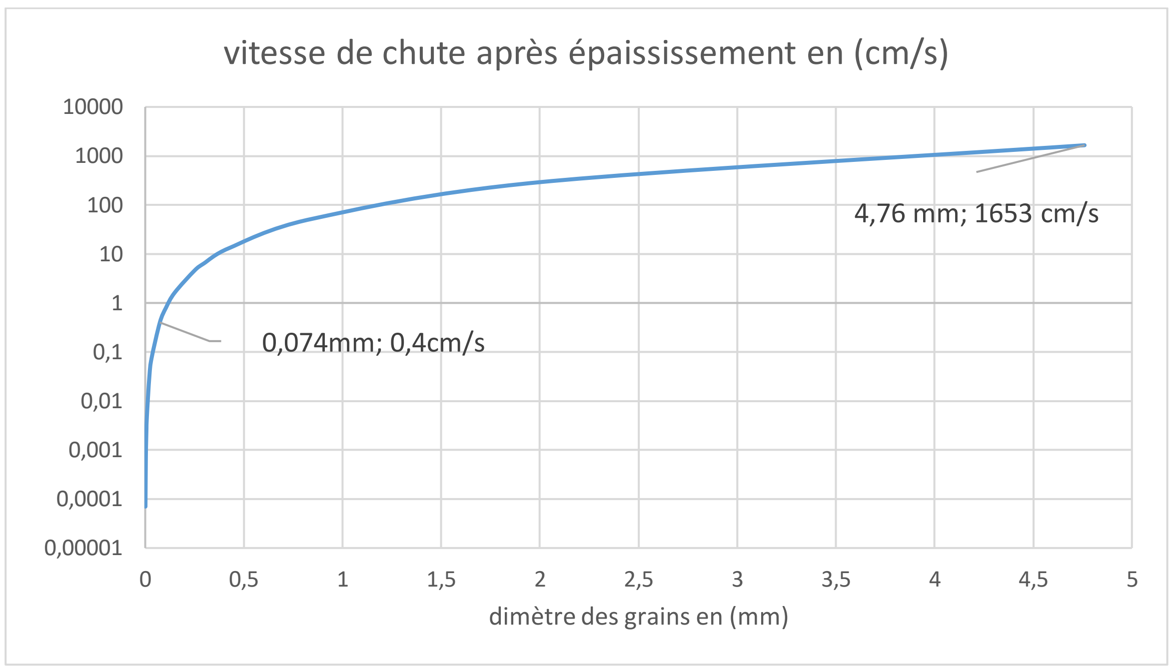


Figure 13: courbe de la vitesse de chute en fonction du diamètre des grains

III. Caractéristiques du produit boue :

1. Teneur en eau

On désigne par teneur en eau (moisture content en anglais) la quantité d'eau liquide contenue dans un échantillon de matière, cette quantité étant évaluée par un rapport pondéral au sens ingénieur ou volumétrique au sens physicien. Elle est exprimée par :

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

W_w : Poids de l'eau en Kg

W_s : Poids des grains en Kg

w : Teneur en eau exprimée en %

As Received Moisture Content	
Moisture Content (%)	167.53

2. Gravité spécifique

La gravité spécifique est le rapport entre la masse volumique d'une substance (partie solide) et la masse volumique d'une substance de référence (eau). De manière équivalente, il s'agit du rapport entre la masse d'une substance et la masse d'une substance de référence pour un même volume donné.



$$SG = \frac{\rho_{solide}}{\rho_{H2O}}$$

Specific Gravity	
Specific Gravity	1.31

3. Limites d'Atterberg :

Le but de l'essai des limites d'Atterberg est d'identifier et classifier les l'échantillon, et pour déterminer La limite de plasticité on utilise la "Méthode du rouleau». Quant à la limite de liquidité, se détermine par la "Méthode de la Coupelle de Casagrande".

1. Appareillage :



Figure 14: appareillage de détermination des limites d'Atterberg

2. Mode opératoire :

Cet essai est réalisé sur la partie granulométrique appelée mortier inférieur à 0,4mm

- On malaxe rigoureusement la totalité de l'échantillon afin de bien homogénéiser
- On remplit la coupelle au tiers.
- On trace le milieu de l'échantillon à l'aide d'un outil à rainurer et l'essai comme immédiatement
- La coupelle fixée à l'appareil est soumise à une série de chocs réguliers jusqu'à ce que les deux lèvres se ferment (le nombre de coups de fermeture doit être compris entre 15 et 35)

Pour confirmer le nombre de chocs, il faut recommencer immédiatement l'essai, si les deux essais successif ne différent pas plus d'un choc, on prélève à l'aide d'une spatule deux échantillon de chaque côté des lèvres et on détermine la teneur en eau.

3. Calcul des limites d'Atterberg :

W_L : la limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à la fermeture à 25 coups.



Pour déterminer W_p, on prend une partie du mélange et on essaye de faire des petits rouleaux sur une plaquette jusqu'à obtenir un diamètre de 3mm.

Après on soulève le rouleau à 1 ou 2cm au-dessus du plancher, quand il se fissure et rompt. On prélève sur chaque morceau des échantillons pour déterminer la teneur en eau qui sera la valeur de W_p, Et il en vient l'indice de plasticité $I_P = W_L - W_P$

Pour le cas de notre produit boue, on trouve :

Atterburg Limits	
Liquid Limit (%)	46.7
Plastic Limit (%)	23.6
Plasticity Index	23.1

4. Classification USCS :

La classification USCS (Unified Soil Classification System) (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

- des critères granulométriques : les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisats à 2 mm et 0,08 mm); la forme de la courbe granulométrique : coefficient d'uniformité ou de Hazen Cu, coefficient de courbure Cc (ou Cz).
- les caractéristiques de plasticité W_L et I_P, et la ligne A d'équation :
  $I_P = 0{,}73*(W_L – 20)$ (relation de Casagrande).
- la teneur en matières organiques.

La classification peut également s'effectuer à partir de l'observation visuelle du sol et de tests simples de chantier. Mais il faut une grande expérience pour appliquer correctement cette méthode de classification de chantier.

- **Les groupes de sols :** Le système de classification USCS débouche sur 15 sols types, affectés chacun d'un symbole à deux lettres, prises dans les trois ensembles suivants :



Éléments du sol	Granularité du sol	Plasticité du sol
G : Grave. Le gravier est la fraction principale **S :** Sable. Le sable est la fraction principale **L :** Limon ou limoneux **A :** Argile ou argileux **T :** Tourbe **O :** Organique. Le sol contient des matières organiques	**b :** Bien gradué **m :** Mal gradué	**t :** Très plastique **p :** Peu plastique

Tableau 4: groupes de sols

- **La procédure de classification :** La figure 15 donne la classification des sols fins et le tableau 5 la classification des sols grenus.

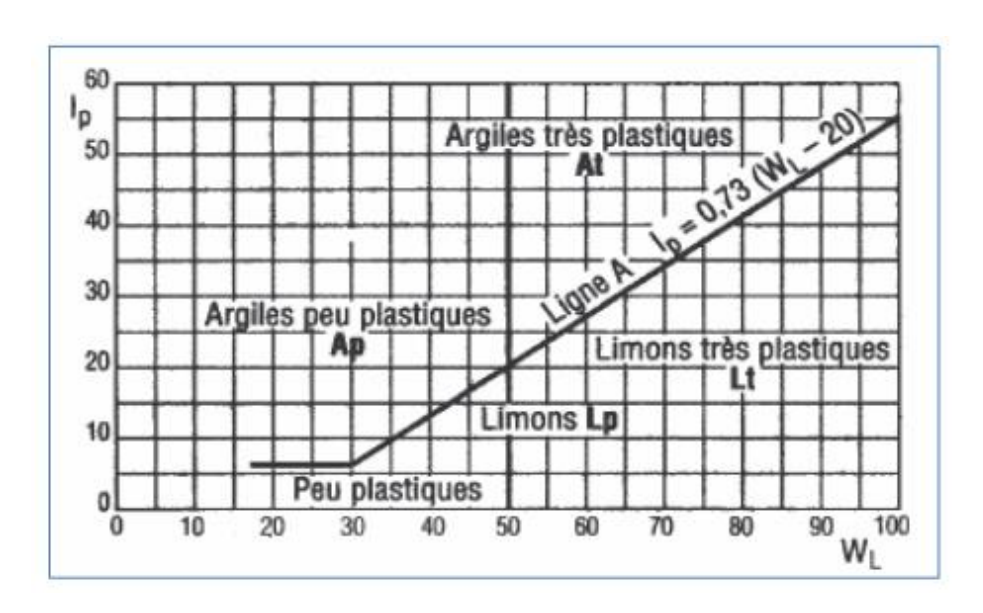


Figure 15: classification des sols fins



Définitions			Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations
Graves	**Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2mm**	**moins de 5% d'éléments < 0,08 mm**	**Gb (GW)**	**$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < C_c = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$**	**Grave propre bien graduée**
			Gm (GP)	**Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite**	**Grave propre mal graduée**
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	**GL (GM)**	**Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A**	**Grave limoneuse**
			GA (GC)	**Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A**	**Grave Argileuse**
Sable	**Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm**	**moins de 5% d'éléments < 0,08 mm**	**Sb (SW)**	**$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < C_c = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$**	**Sable propre bien gradué**
			Sm (SP)	**Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite**	**Sable propre mal gradué**
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	**SL (SM)**	**Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A**	**Sable limoneux**
			SA (SC)	**Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A**	**Grave Argileux**
Lorsque la teneur en particules fines (< 0,08 mm) est comprise entre 5% et 12% on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL					

Tableau 5: classification des sols grenus

Pour notre cas, on a W_L=46,7% et I_P=23,1% donc selon la figure 15 la boue est considérée comme argile peu plastique et on a selon la figure 11 : plus de 50% des éléments >0,08mm et ont un diamètre < 2mm, donc selon le tableau 5 la boue est un sable et puisque plus de 12%



d'éléments < 0,08 mm selon la figure 11, donc on a le choix entre les classifications : SM et SC.

Et on selon la figure 15 le point représentant de la boue est au-dessus de la ligne A, d'où la classification de la boue selon la norme USCS :

USCS Classification
Clayey sand (SC)

5. Composition du total solide :

Le total solide est déterminé à partir de la teneur en eau par :

$$TS = \frac{1}{1+w}$$

Puisque :

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_T - W_s}{W_s} = \frac{1}{TS} - 1$$

Avec TS : total solide en %

w: Teneur en eau en %

W_s : Poids solide en Kg

W_w : Poids de l'eau en Kg

W_T : Poids total de l'échantillon (solide+eau) en Kg

Pour notre produit boue, on trouve :

Total Solids	
Total Solids (%)	37.38

Remarque : on constate que les essais faits par le laboratoire externe RADISE nous donnent un pourcentage de solide de 37,38% après épaississement, or le bureau d'études JACOBS S.A a dimensionné le décanteur et la digue d'épandage à un pourcentage de solide de 35%, qu'on va utiliser dans la simulation.

Chapitre IV : Modélisation du comportement de la boue à l’intérieur de la digue



Si le modèle de fluide newtonien décrit bien la très grande majorité des fluides composés de molécules simples, il existe un bon nombre de fluides, dont certains sont d'usage très courant, qui ont un comportement sous l'écoulement plus complexe. La définition d'un fluide newtonien est assez restrictive : les contraintes de cisaillement sont proportionnelles au gradient de vitesse, ce qui implique que :

- Dans un écoulement de cisaillement simple, les seules contraintes crées par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement.
- La viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté.

Toute déviation de ces règles est le signe d'un comportement non-newtonien. La description de ces comportements et leur interprétation en relation avec la structure microscopique du fluide constitue la discipline appelée **Rhéologie**.

I. Hypothèses de l'étude :

%Gravel	%Sand	%Silt	%Clay
0	46	21.5	32.5

Tableau 6: composition de la boue

- La boue avec un taux de solide de 35% est considérée comme fluide non newtonien rhéo-épaississant (shear thickening).
- Avec un taux d'argile (Clay) égal à 32.5% (> 10%), la boue est considérée comme matériau cohésif.



II. Etude théorique de l'écoulement de la boue à l'intérieur de la digue :

Pour ce faire, on va diviser le bassin en trois parties :

1ère étape : Jet de la boue dans le bassin

2ème étape :

- érosion et dépôt du solide.
- Décantation, consolidation et drainage.

3ème étape : écoulement de l'eau vers les points de collecte.

1. Etude de l'écoulement de la boue à l'entrée de la digue (théorie du JET) :

Pour le cas de la digue d'épandage de Benguerir, les conduites d'entrée utilisées sont circulaires de diamètre 400 mm, donc on va étudier le cas d'un jet circulaire.

Le jet est bidimensionnel puisque les conduites vont être allongées le long du talus nord du bassin.



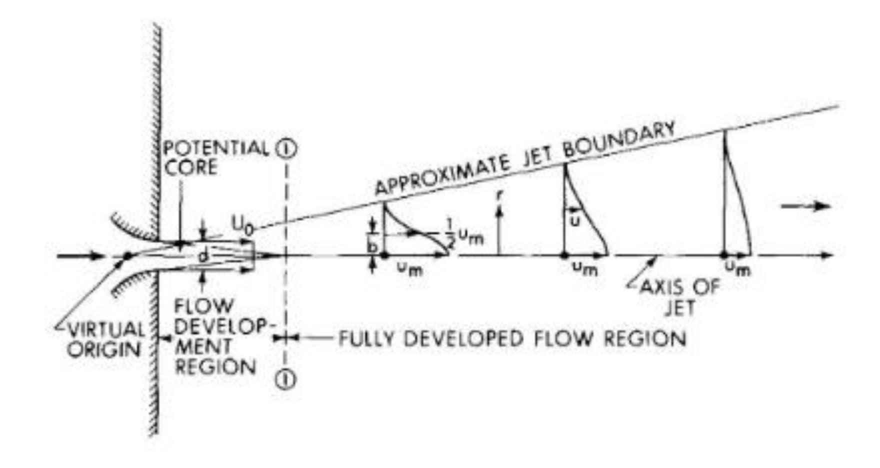


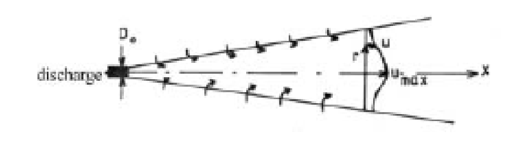
Figure 16: zones de développement d'un Jet

- **<u>'flow development region '</u>** connue également par la zone de développement du jet, sa longueur est estimée de [0 ; 6-10D$_0$]. Pour notre cas ça donne [0 ; 4m].
- **<u>'fully developped flow region'</u>** connue par la région du jet totalement développée, elle s'étend de 4m à l'infini.

La vitesse et la concentration du taux de solide suivant l'axe du jet :

$$\frac{u_{max}}{u_0} = 6.2\frac{D_0}{x}$$

$$\frac{c_{max}}{c_0} = 5.6\frac{D_0}{x}$$

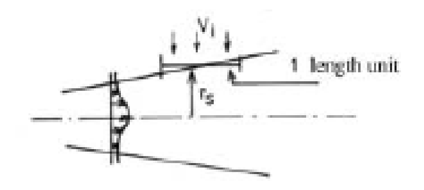


La vitesse des particules à une distance r de l'axe du jet et à une distance x de l'entrée :

$$\frac{u}{u_{max}} = \exp\left(-77\frac{r^2}{x^2}\right)$$

$$\frac{c}{c_{max}} = \exp\left(-62\frac{r^2}{x^2}\right)$$

✓ La vitesse d'entrainement radial v ne dépasse pas les 5% de la vitesse axiale maximale u_{max}





Ces équations sont développées à partir des équations de Reynolds exprimées dans le système cylindrique.

2. Applications des équations du jet pour notre cas :

Pour D_0=400mm, u0= 1,65 m/s, C_0= 1,31 Kg/L, on a :

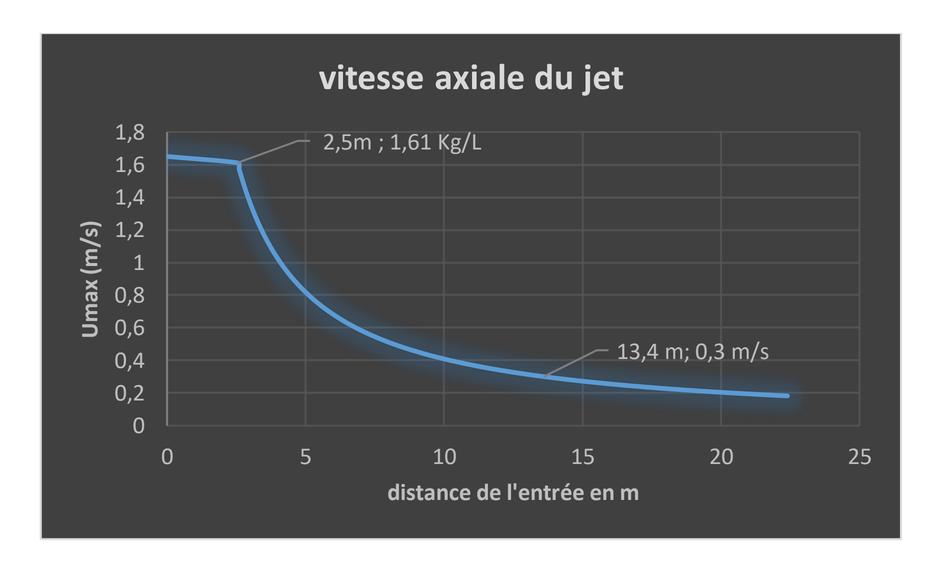


Figure 17: vitesse de la boue suivant l'axe du jet

On constate que la vitesse maximale suivant l'axe reste à une valeur de u_0 sur une distance de 2,5m, après elle diminue pour arriver à 0,3m/s à une distance de 13,4m.

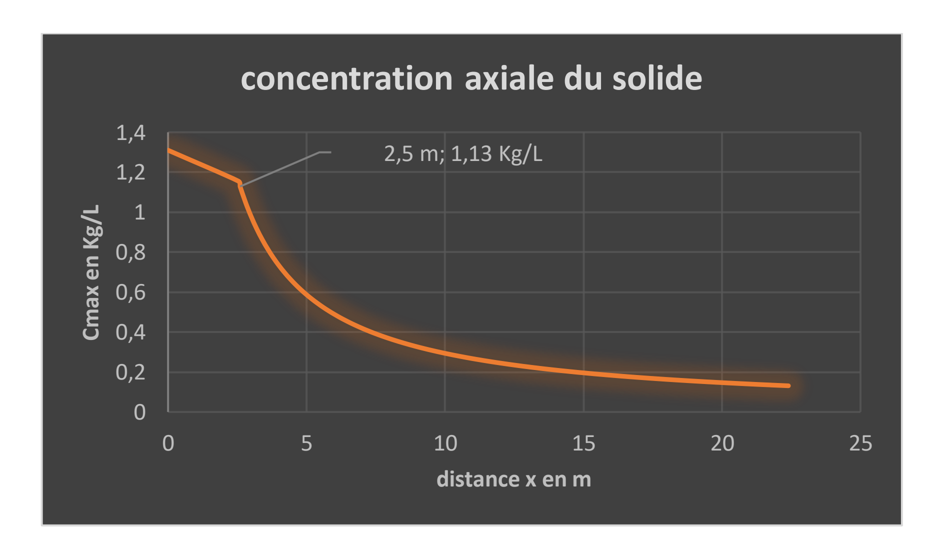


Figure 18: concentration du solide suivant l'axe du jet

On constate que la concentration en solide diminue rapidement à une valeur de 142g/L à une distance de 20m à partir de l'entrée.



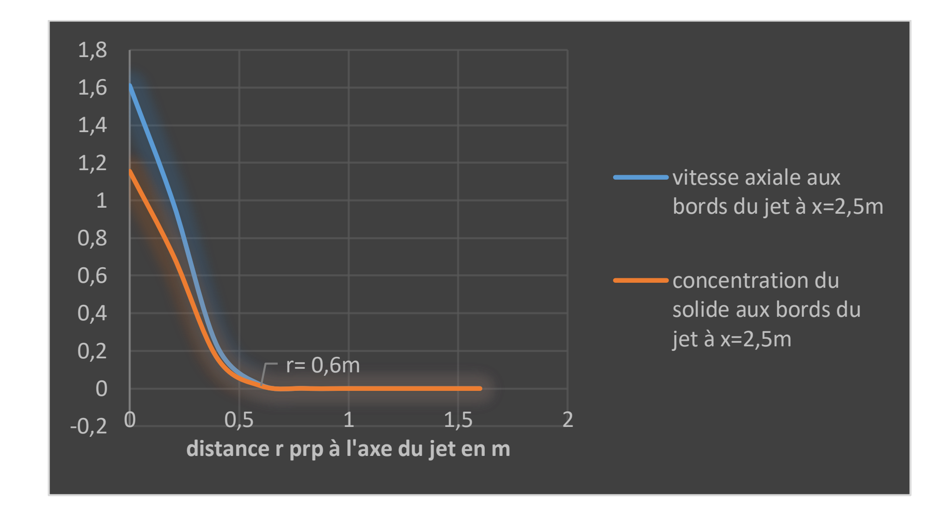


Figure 19: caractéristiques du jet à 2,5m de l'entrée

On constate que la vitesse et la concentration en solide diminuent rapidement pour s'annuler à une distance de 60cm à partir de l'axe du jet. Donc le jet est encore concentré autour de son axe principal.

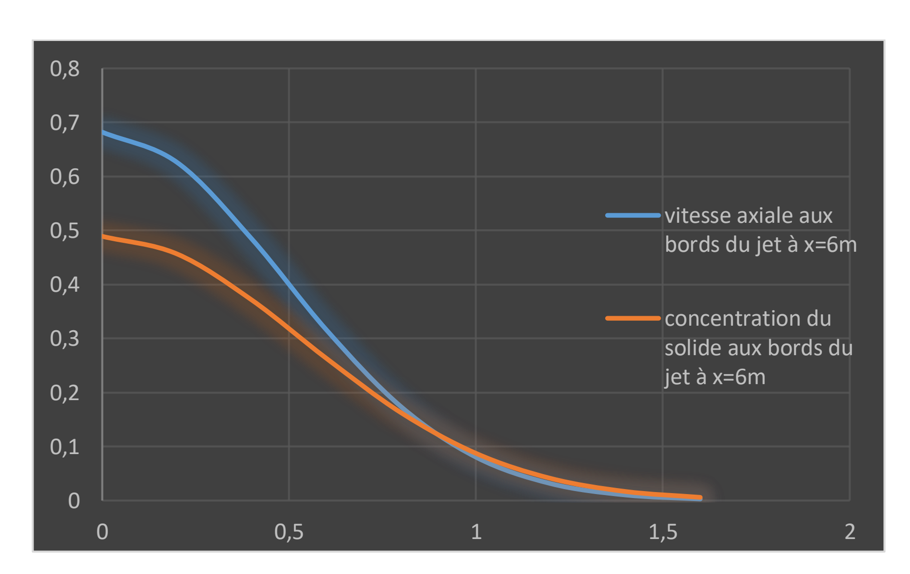


Figure 20: caractéristiques du jet à 6m de l'entrée

On constate qu'à une distance de 6m à partir de l'entrée le jet commence à s'élargir et avoir une distribution de solide plus étalée.



3. Etude du comportement de la boue à l'intérieur de la digue :

1. Développement des équations de Saint Venant:

Dans le cas bidimensionnel, pour décrire la hauteur de l'eau dans le bassin on utilise les équations de Saint-Venant :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\Big((H+h)u\Big) + \frac{\partial}{\partial y}\Big((H+h)v\Big) = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g\frac{\partial h}{\partial x} - bu + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g\frac{\partial h}{\partial y} - bv + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

Avec :

u Vitesse suivant x, direction de l'écoulement
v Vitesse suivant y
h Hauteur entre la surface libre d'eau et le terrain
H Elévation de la surface du terrain par rapport à la référence
g L'accélération due à la gravité
f Coefficient de Coriolis associé à la force de Coriolis
b coefficient de la trainée visqueuse
v La viscosité cinématique

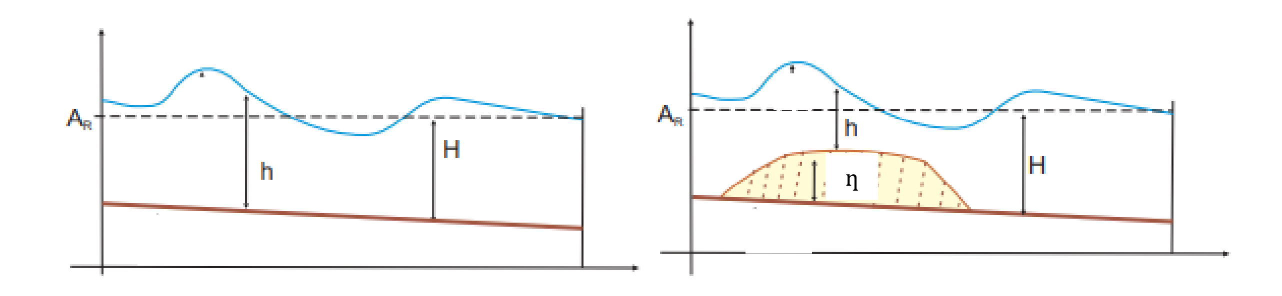


Figure 21: schéma des paramètres utilisés dans les équations



2. Développement de l'équation d'Exner pour la dispersion des particules :

L'équation qui donne la variation du lit η en fonction du temps t, du coefficient de dispersion ε_0 et du débit solide q_s.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_o}\nabla \cdot \mathbf{q_s}$$

Avec : $\varepsilon_0 = \frac{1}{1-\rho_0}$ tel que ρ_0 est la porosité des sédiments du lit.

<u>L'étude du comportement de la boue à l'intérieur du bassin est obtenue par le couplement des équations de Saint-Venant et l'équation d'Exner (voir la figure 21 pour la notation utilisée):</u>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\Big((H+h)u\Big) + \frac{\partial}{\partial y}\Big((H+h)v\Big) = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g\frac{\partial h}{\partial x} - bu + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g\frac{\partial h}{\partial y} - bv + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

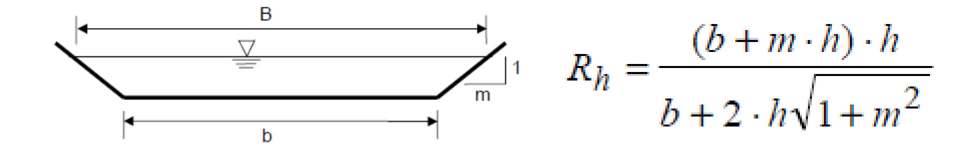
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_o}\overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{\mathbf{q_s}}$$

3. Caractérisation de l'écoulement à l'intérieur de la digue :

On a trouvé que la vitesse après 6 m du nord du bassin (zone du jet totalement développé) ne dépasse pas 0,7m/s, on a le nombre de Froude suivant :

$Fr = \frac{U}{\sqrt{g*D}} = 0,16 < 1$ → <u>Régime fluvial</u>

Avec : U=0,7m/s, D=4*R_h, g=9,81m/s^2, $= 10^{-6} m^2/s$, h=0,5m (on a intérêt à garder la hauteur d'eau faible).



$$R_h = \frac{(b+m\cdot h)\cdot h}{b+2\cdot h\sqrt{1+m^2}}$$

Puisque b est très supérieur à h, on estime le rayon hydraulique R_h à h.

On calcule le nombre de Reynolds :



$R = \frac{U*D}{v} = 1400000 \ > 2000$  écoulement turbulent

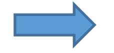
4. Transport de sédiments en régime fluvial :

1. Classification du transport de sédiments :

On distingue deux types :

Wash load (transport par lessivage) : correspond aux particules très fines (silt et argiles) qui demeurent en suspension quel que soit le régime d'écoulement fluide.

Bed material load (transport du fond et des berges) : correspond au transport de sédiments (sable et gravier) qui demeure lié aux matériaux du lit et aux berges et se manifeste en transport durant les écoulements turbulents.

 **Modes de transport dans un écoulement turbulent :**

- ✓ Charriage de fond (roulement et glissement)
- ✓ Saltation (sauts successifs)
- ✓ Suspension (transport permanent au sein du fluide)
- ✓ Solution (transport chimique)

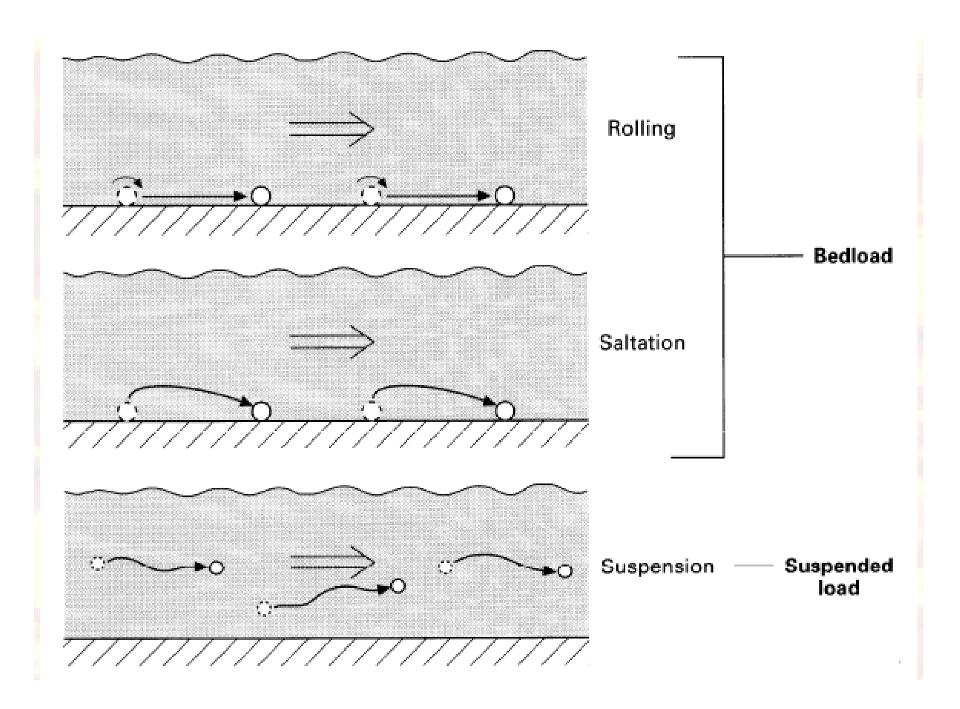


Figure 22: différents modes de transport des sédiments

2. Interprétation hydraulique de la distribution granulométrique :

- **Diagramme de Shields :**



Le mouvement d'une particule se produira quand les forces instantanées exercées par le fluide sur la particule sont juste supérieures aux forces de résistance instantanée apparentée au poids submergé de la particule et au coefficient de frottement. Les forces d'entraînement sont fortement liées aux vitesses locales près du fond. Dans des conditions turbulentes de l'écoulement, les vitesses sont fluctuantes dans l'espace et dans le temps, ce qui montre, avec l'aspect aléatoire de la taille des particules, la forme et la position, que le début de mouvement et d'entraînement n'est pas seulement un phénomène déterministe mais aussi un processus stochastique.

Bonnefille(1963) et Yalin (1972) ont montré que la courbe de Shields peut être exprimée d'une façon plus simple, en introduisant le diamètre adimensionnel de la particule D_* :

$$D_* = \frac{(s-1) * g}{\vartheta^2}^{1/3} * D_{50}$$

Avec :

D_* : diamètre adimensionnel

s : gravité spécifique adimensionnel

ϑ : viscosité cinématique de l'eau en m^2/s

D_{50} : diamètre à 50% de passants en m

$g=9,81\ m/s^2$

Selon la courbe granulométrique figure 17 on a :

D_{50} = 0,074 mm ; s= 1,31 ; $\vartheta=10^{-6}\ m^2/s$; $g=9,81\ m/s^2$ on trouve : D_*=75 (adimensionnel)

Ainsi, la courbe de Shields peut être représentée par :



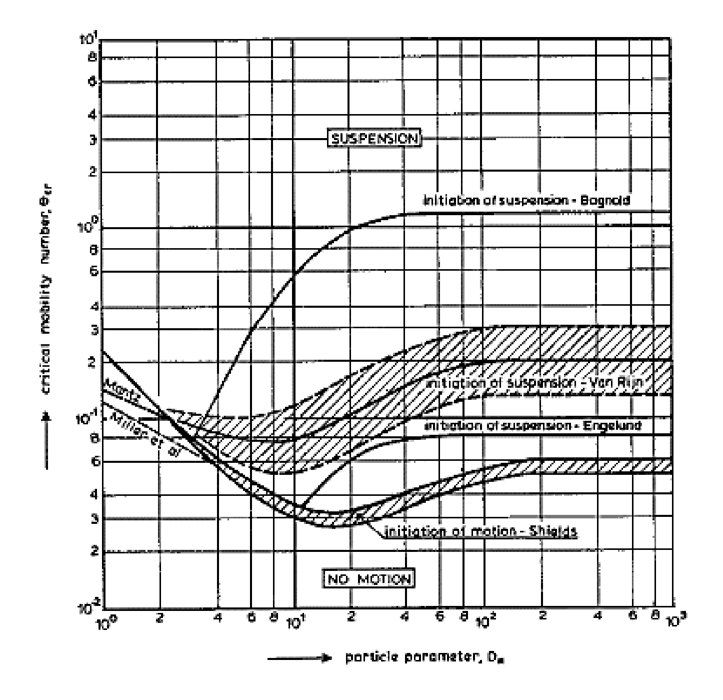


Figure 23: Début de mouvement et de suspension sur un fond plat

Avec : $\theta_{cr} = \frac{u_*^2}{(s-1)*g*d}$ **:** paramètre critique de Shields

La contrainte de cisaillement au fond : $\tau_{b,cr} = \rho * u_{cr}^2$

En se basant sur D* calculé et à partir du diagramme de Shields (courbe de Van Rijn), on trouve la valeur critique de début de mouvement:

Log (D*)= 1,87 ; la courbe nous donne donc : log(θ_{cr})=1 donc θ_{cr}=2,718

$$\text{Ucr} = \sqrt{\theta\text{cr} * (s-1) * g * d_{50}} = 0{,}025 \text{ m/s}$$

cette valeur reflète une idée sur la granulometrie fine de la boue, et puisque la vitesse à l'entrée est de l'ordre de 0,7 m/s et l'écoulement est turbulent donc on aura une érosion forte à l'entrée.

3. Dépôt :

Le dépôt est prédominant quand la contrainte de frottement au fond (τb) est inférieure à la valeur critique de dépôt(τd), comme il a été montré par Krone (1962). Il a étudié le processus de dépôt des matériaux cohésifs en appliquant différentes vitesses générant une circulation de la vase naturelle dans un canal du laboratoire. 60% des particules composant le matériau (vase de San Francisco Bay) avaient une taille inférieure à 2 µm, et 50% avaient une taille inférieure



à 1 μm. Krone a montré que le taux de deposition du solide est fortement proportionnnel à la concentration en sediments.

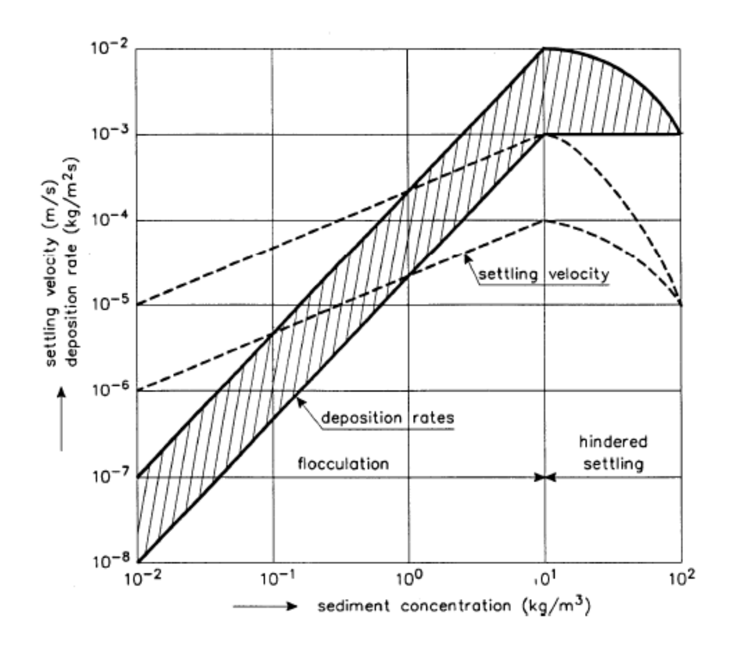


Figure 24: Taux de dépôt en fonction de la concentration

4. Erosion :

Les particules sédimentaires, les floques ou les morceaux de la surface du fond subiront des érosions quand la contrainte de cisaillement au fond appliquée (τ_b) dépasse la valeur critique d'érosion(τ_e), qui dépend des caractéristiques du matériau du fond(composition minérale, matériaux organiques, salinité, densité etc.) et de la structure du fond. Des résultats expérimentaux et des recherches ont montré que cette valeur critique est supérieur à la valeur critique de dépôt($\tau_e > \tau_d$). Mehta et Partheniades(1975) ont constaté que même pour des contraintes de cisaillement supérieures à 1.5 N/m² dans un écoulement stationnaire, aucune érosion n'est observée, car le fond a été composé de floques déposés de forte densité. Ainsi, τe peut être très grand dans le cas des couches supérieures du fond composées de forts dépôts de floques.

Plusieurs types d'érosion sont distingués dans la littérature :

1. L'érosion de surface qui correspond à une érosion de particules une à une ou sous forme de floques.
2. L'érosion de masse qui consiste en mouvement (pick-up) de floques ou de fragments à cause de fissures dans le fond. Plusieurs tentatives ont essayé de lier τe à certains paramètres de base comme l'indice de plasticité, l'indice des vides, la teneur en eau, la cohésion etc.



1. Erosion des matériaux récemment consolidés :

Pour les matériaux récemment consolidés, la contrainte d'érosion critique est calculée à partir de la vitesse critique, on trouve:

$$\tau_e = \rho * u_{cr}^2$$

$\rho = 10^3$ Kg/m^3 ; $u_{cr} = 0{,}025 m/s$

$$\tau_e = 0{,}63 N/m^2$$

2. Erosion des matériaux très consolidés :

Pour les matériaux très consolidés, on parle de probabilité d'érosion qui dépend de la vitesse de l'eau au point considéré et la hauteur d'eau au-dessus du point, par exemple, pour une vitesse de 0,7 m/s (trouvée à une distance de 6m de l'entrée) et une hauteur d'eau de 8cm, on est à 50% sûr que les particules très consolidées vont être érodées.

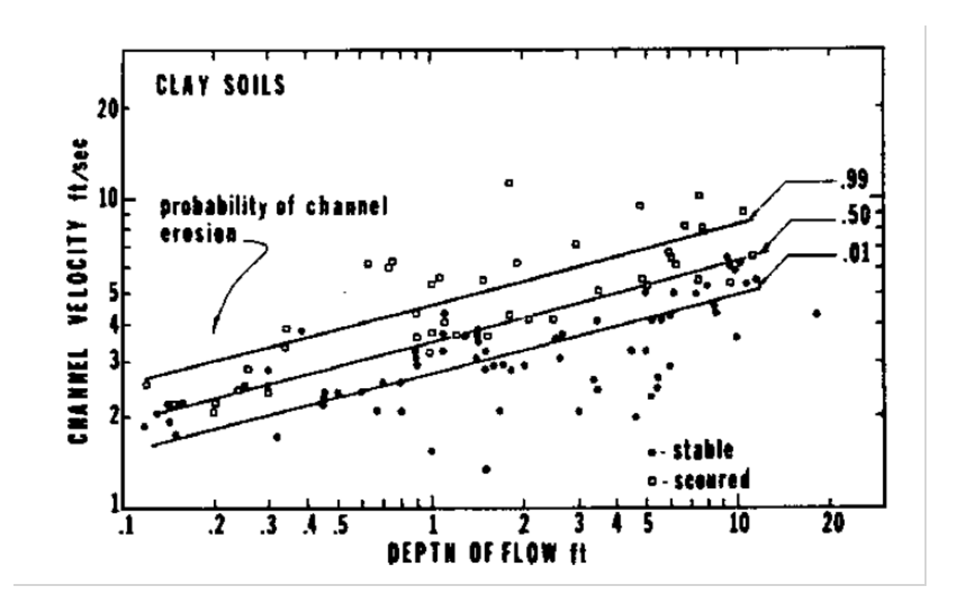


Figure 25: Vitesses critiques d'érosion pour des dépôts argileux très consolidés, Hughes(1980)

5. Écoulement de l'eau vers les points de collecte:

En utilisant la formule de Manning-Strickler donnant la vitesse moyenne de l'écoulement, on calcule la vitesse pour différentes pentes, afin de pouvoir comparer le temps nécessaire pour qu'une goutte d'eau arrive à la sortie après drainage de la boue :

$$V = K * R_h^{\frac{2}{3}} * i^{1/2}$$

R_h =h= 0,5m
B≈ 600m



Nature des parois	Valeur de K en $m^{1/3}/s$
Béton lisse	75
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Tableau 7 : coefficient de Manning-Strickler

On prend :

K= 13 $m^{1/3}/s$

$i = 1‰$ $V = 0{,}26 m/s$

$i = 1\%$ $V = 0{,}82 m/s$

$i = 2\%$ $V = 1{,}16 m/s$

Plus la pente est grande plus la récupération d'eau est plus rapide.

III. Simulation sur RIFT TD

1. Présentation du logiciel RIFT TD :

Rift TD est un modèle numérique de terrain tridimensionnel avancé spécialement conçu pour modéliser le dépôt de résidus. C'est un outil puissant qui facilite l'installation de stockage des résidus, il permet :

- évaluation des options / sélection du site
- conception conceptuelle et détaillée
- planification des dépôts
- fonctionnement et gestion
- Gestion de l'eau

Rift TD est utilisé souvent pour modéliser la déposition des résidus à l'amont et à l'aval des barrages et la gestion des déchets dans les bassins de rétention tout en modélisant les variations des volumes d'eaux, c'est un logiciel payant mais la version complète existe également sous licence d'évaluation.



✓ Fonctionnement du logiciel :

Après introduction des données nécessaire pour lancer la simulation, on choisit un pas d'élévation entre la déposition n et la déposition n+1. Rift TD lance le jet des résidus et au cours de la déposition n par exemple, les courbes de niveaux caractérisent l'élévation de la boue jusqu'à atteindre l'élévation de la déposition n+1 et le logiciel nous donne les informations propres à la déposition n (la durée de la déposition, le volume et le tonnage cumulé, le volume de l'eau généré..).

2. Présentation des données :

- Le débit solide : 4573 tonnes/jour (190,51 tonnes/heure)
- Le débit de l'eau : 544,31 tonnes/heure
- Le débit de boue : 734,82 tonnes/heure

Ce sont les débits nominaux de dimensionnement des conduites liant le décanteur à la digue d'épandage.

- La densité après consolidation et drainage (55% de solide) du profil subaérien : 1,4 t/m^3 (sub-aerial dry density)

Selon le bureau d'études Team Maroc, le but est d'atteindre une consolidation à 55% de solide sur les trois ans premiers pour la digue de Benguerir, qui correspond à une gravité spécifique de 1,4 t/m^3.

- La densité après consolidation et drainage du profil subaquatique: 1,2 t/m^3 (sub-aqueous dry density)



Figure 26: profil subaérien et subaquatique



- La pente choisie pour la plage subaérienne est fixée par expérience à 5‰ pour ne pas avoir un tassement différentiel lors de la consolidation, et celle de la plage subaquatique est égale à 2% afin d'avoir un drainage rapide de l'eau.
- Le volume d'eau récupéré est maitrisé par la revanche (freeboard) de stabilité estimée à 2m.

Les points d'entrées varient suivant la pente du talus (1V/2,6H) verticalement de 472NGM à 485NGM (la hauteur du bassin= 13m =485NGM - 472NGM), le pas d'élévation dépend de l'incrémentation choisie, on prend 50 incrémentations c'est à dire :

Pas =13/50=26cm équivalent à 73cm suivant le talus.

débit solide journalier t/jr	débit boue journalier t/jr	débit boue journalier m^3/jr
4573	17635,68	14696,4

Tableau 8: données utilisées pour la simulation

Le début de simulation choisi : 18/04/2019

Les scenarios étudiés :

pente	4 chicanes
0%	sans chicanes
1‰	sans chicanes
	avec chicanes
1%	sans chicanes
	avec chicanes
2%	sans chicanes
	avec chicanes

Tableau 9: scénarios étudiés

3. Présentation des résultats :

   1. Scenario 1 : Digue d'épandage à pente 0% sans chicanes

✓ Géométrie :



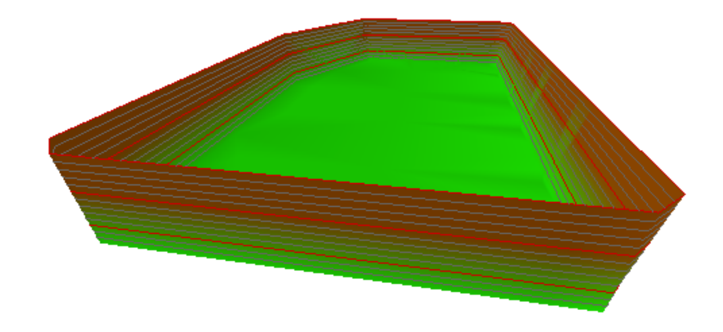


Figure 27: géométrie de la digue à une pente 0%

En utilisant VBA excel, j'ai pu programmer un algorithme afin de dessin le bassin pour toute pente voulue avec l'option d'ajouter un nombre de chicanes.

pente %	chicanes	durée 1ère récupération en jr	% récupéré par 30 jrs	durée de saturation
0	Sans	68	41,33	3 ans 7 mois 20 jours

Tableau 10: résultats de récupération d'eau de la digue à une pente 0%

✓ Les formules de calcul :

La durée de la 1ère récupération est donnée par le logiciel.

$$\% \, récupéré \; par \; n \; jours = \frac{volume \; collecté \; en \; n \; jours \; (m^3)}{n * débit \; de \; boue \; journalier}$$

La durée de saturation est donnée par le logiciel.

On constate que cette configuration du bassin n'est pas bénéfique vu que le taux de récupération ne dépasse pas 42%. Concernant la durée de la 1ère récupération, on constate qu'elle dépasse 2mois, c'est normal vu la longueur du bassin qui dépasse 1km et l'absence d'une pente accélérant l'écoulement vers les points de collecte.

✓ Le bassin après saturation :



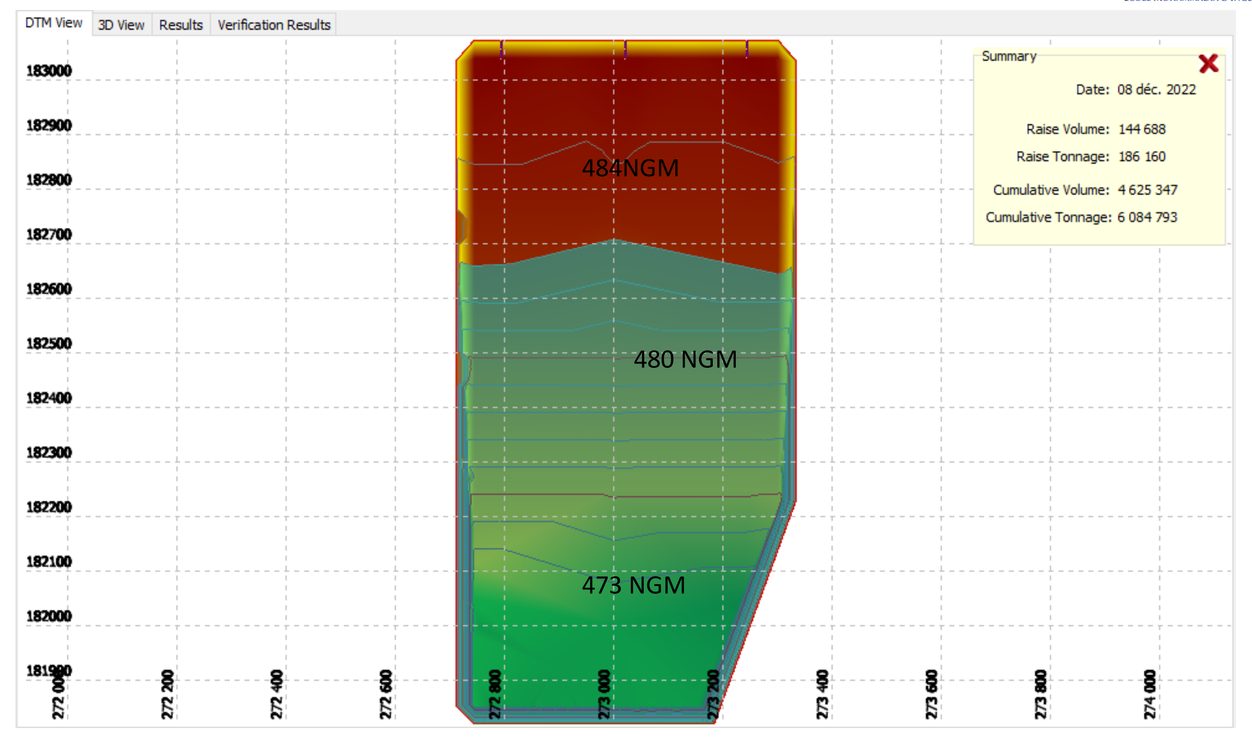


Figure 28: l'élévation de la boue après saturation de la digue à une pente 0%

Date: 08 déc. 2022

Raise Volume: 144 688

Raise Tonnage: 186 160

Cumulative Volume: 4 625 347

volume total du bassin m^3	volume de solide stocké m^3	% de stockage
8 992 958,48	4 625 347,00	51,43

Tableau 11: taux de stockage de la digue à une pente 0%

$$\% \ de \ stockage = \frac{volume \ de \ solide \ stocké \ m^3}{volume \ total \ du \ bassin \ m^3}$$

On constate qu'avec un pourcentage de 52% de stockage de solide (tailings) on perd presque la moitié en terme de capacité de stockage du bassin. Donc ce scenario est à éviter.

✓ L'élévation du bassin en longueur après saturation :



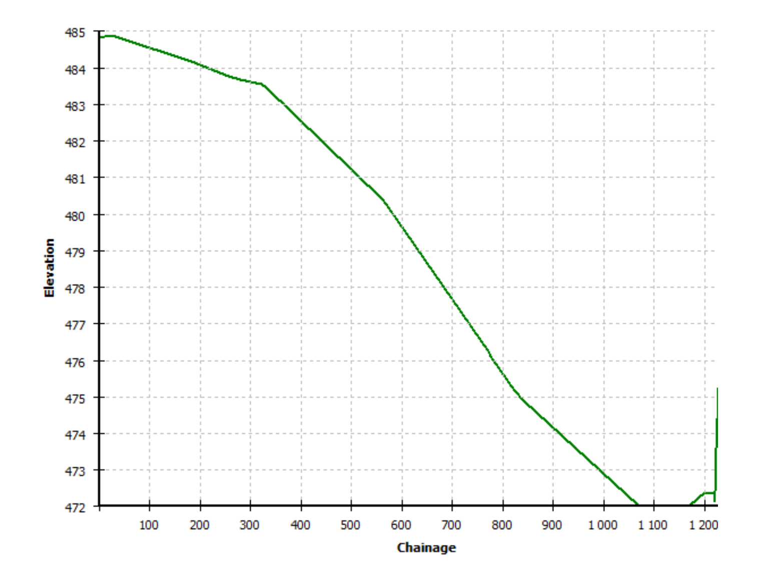


Figure 29: L'élévation du bassin en longueur après saturation

<u>Remarque : le chainage veut dire la distance en (m)</u>

On constate que la boue consolidée et drainée n'est pas bien répartie, en fait, la boue se décante sur les 600 m premiers, d'où la grande perte en terme de stockage. Un autre problème concernant la pente raide de la boue qui va favoriser l'érosion des particules fines, d'où la récupération d'une eau de qualité mauvaise qui va nécessiter un post-traitement.

- ✓ <u>L'élévation en largeur à l'entrée :</u>

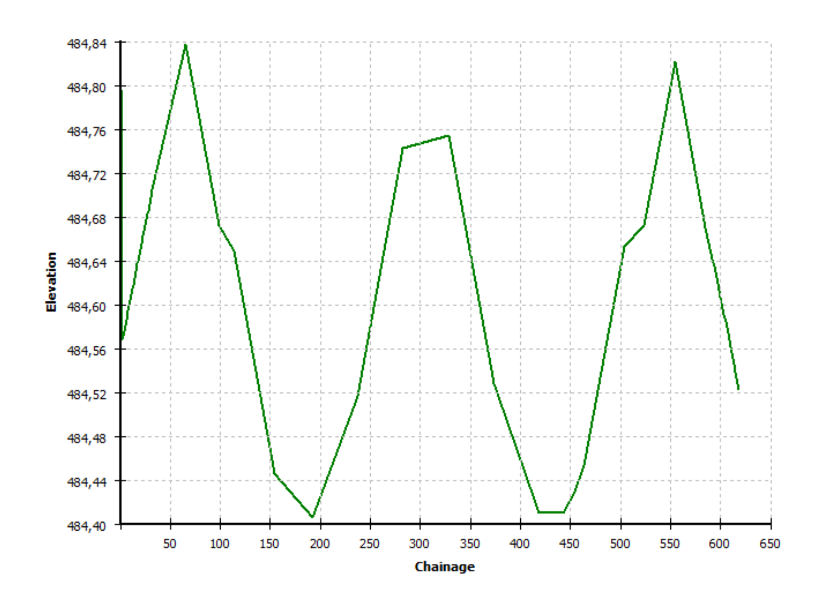


Figure 30: L'élévation du bassin en largeur à l'entrée après saturation

On constate qu'il y a une irrégularité concernant la distribution de la boue en largeur, ce problème est dû au jet dispersif à partir des 3 entrées et leur mauvaise disposition.



2. Scenario 2 : Digue d'épandage à pente 1‰ sans chicanes

✓ Géométrie :

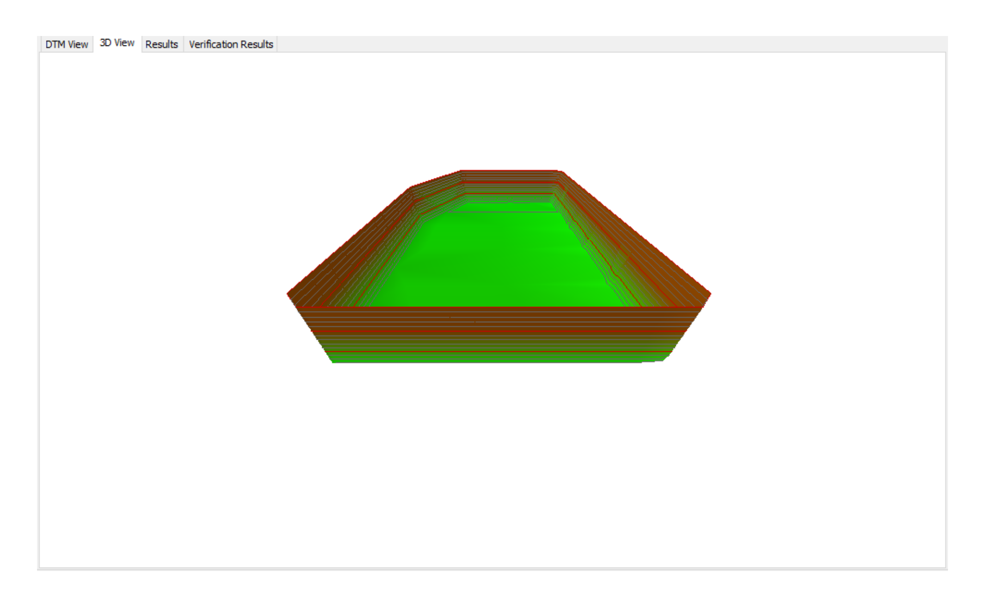


Figure 31: géométrie de la digue à une pente 1‰

pente %	chicanes	durée 1ère récupération en jr	% récupéré par 30 jrs	durée de saturation
1‰	sans	45	40,41	4 ans 11 mois 24 jours

Tableau 12: résultats de récupération d'eau de la digue à une pente 1‰

On constate que cette configuration du bassin n'est pas bénéfique vu que le taux de récupération ne dépasse pas 41%. Concernant la durée de la 1ère récupération, on constate qu'elle est bien inférieure à celle de la pente 0%, c'est normal vu l'existence d'une pente accélérant l'écoulement vers les points de collecte.

✓ Le bassin après saturation :



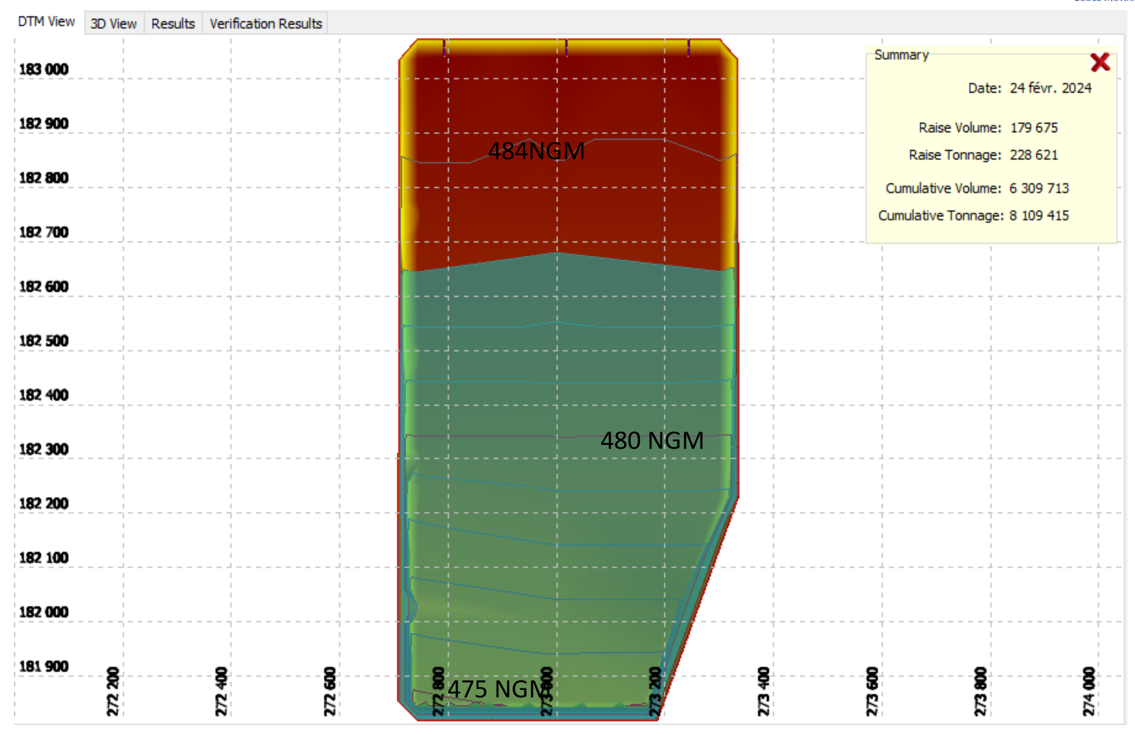


Figure 32: l'élévation de la boue après saturation de la digue à une pente 1‰

Date:	24 févr. 2024
Raise Volume:	179 675
Raise Tonnage:	228 621
Cumulative Volume:	6 309 713
Cumulative Tonnage:	8 109 415

volume total du bassin m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
9 419 593,75	6 309 713,00	66,98

Tableau 13: taux de stockage de la digue à une pente 1‰

On constate que cette configuration nous donne une augmentation du taux de stockage par rapport à la première configuration, et c'est dû à l'effet de la pente qui donne une énergie cinétique aux particules solides pour avancer vers l'avant et gagner plus de volume dans le bassin.



vitesse d'écoulement (m/s)	longueur du bassin (m)	temps de séjour (heure)
0,26	1182,4	1,27

Tableau 14: temps de séjour de l'eau pour une pente 1‰

- ✓ Les formules utilisées :

$$temps\ de\ séjour\ en\ (s) = \frac{longueur\ du\ bassin\ (m)}{vitesse\ moyenne\ d'écoulement\ (m/s)}$$

Le temps de séjour est un paramètre très intéressant, il nous donne une valeur moyenne concernant la durée qu'une goutte d'eau passe au sein du bassin. Tant que ce paramètre est grand, tant que l'eau récupéré à la sortie est de bonne qualité. Pour ce cas, on a trouvé 1h27min, cette valeur est bonne ce qui nous mène à dire que l'eau récupéré est claire.

- ✓ L'élévation du bassin en longueur après saturation :

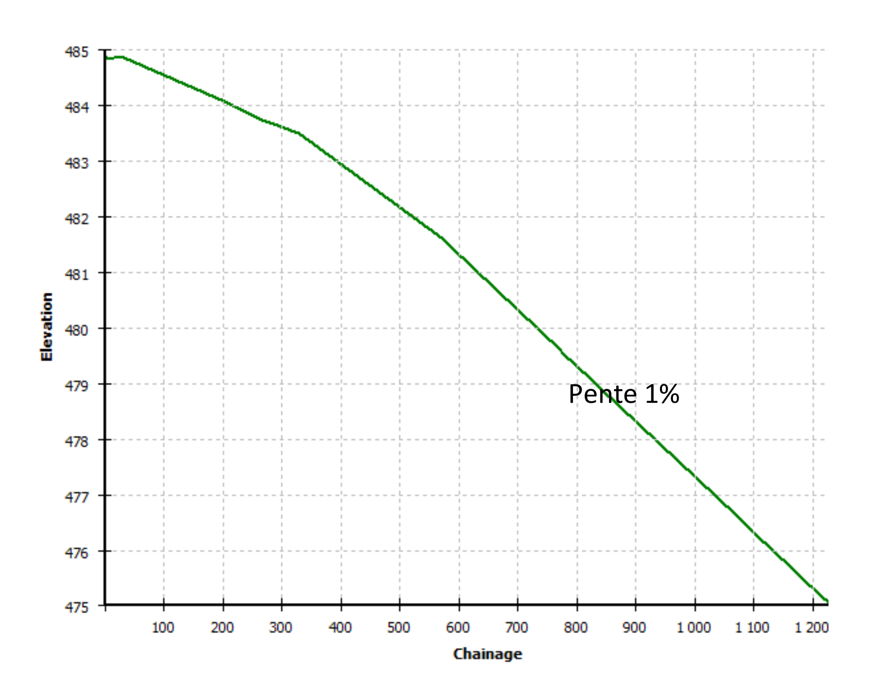


Figure 33: L'élévation du bassin en longueur après saturation à une pente 1‰

On constate que également que la boue consolidée et drainée n'est pas bien répartie, en fait, la boue se décante sur tout le bassin mais il y a toujours ce problème de décantation auprès des entrées, ce qui explique encore la valeur médiocre du pourcentage de stockage.

- ✓ L'élévation en largeur à l'entrée :



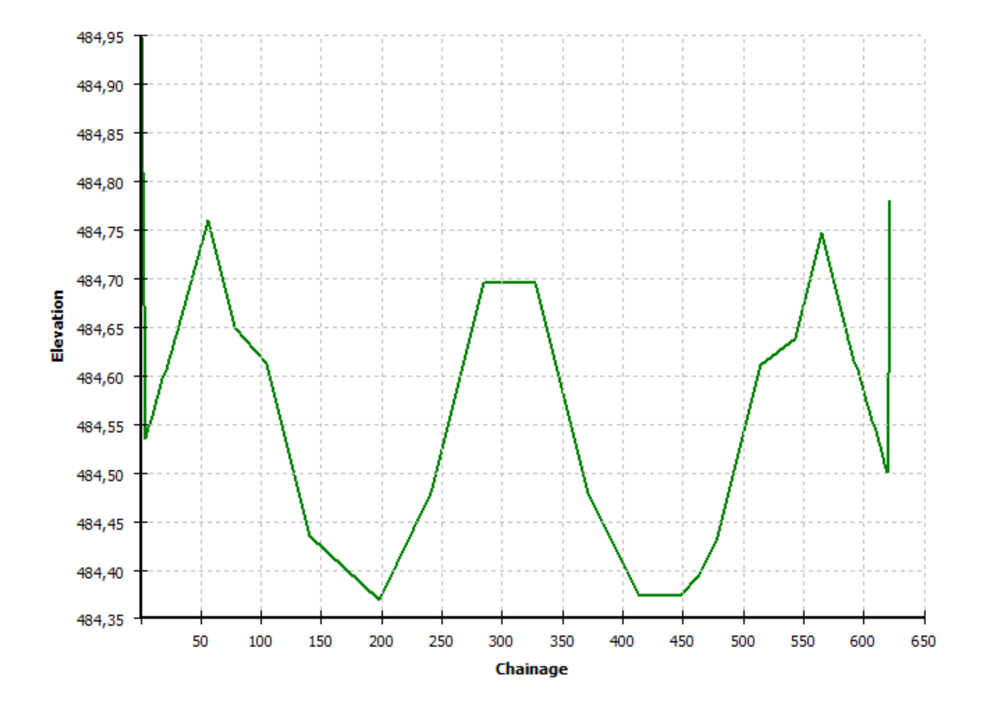


Figure 34: L'élévation du bassin en largeur à l'entrée après saturation 1‰

On constate également qu'il y a une irrégularité concernant la distribution de la boue en largeur, ce problème est dû au jet dispersif à partir des 3 entrées et leur mauvaise disposition. Les trois sommets correspondent aux trois entrées fixées.

- ✓ <u>L'élévation en largeur à la sortie :</u>

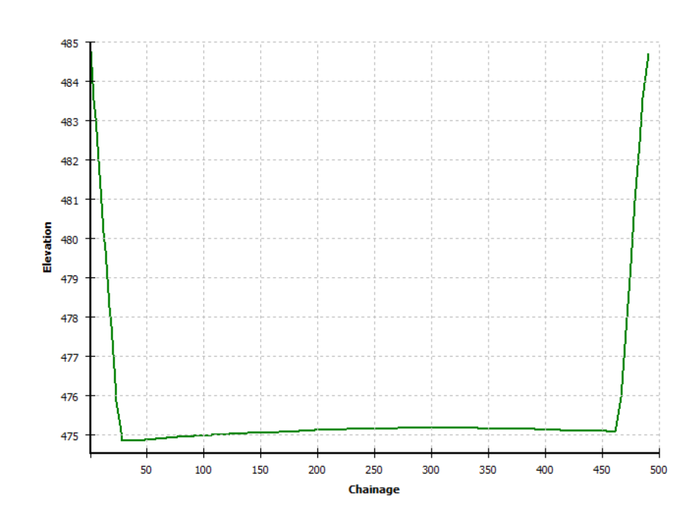


Figure 35: l'élévation en largeur à la sortie à une pente 1‰

La cote de la boue à la sortie arrive à 475 NGM et le terrain naturel est à 470,81 NGM, donc on aura une élévation de 4,19 m de solide à la sortie.



→ Ce scenario est mieux que le premier, mais il n'est pas encore optimal, le pourcentage de stockage est encore faible ainsi que le pourcentage de récupération.

3. Scenario 3 : Digue d'épandage à pente 1% sans chicanes

- ✓ Géométrie :

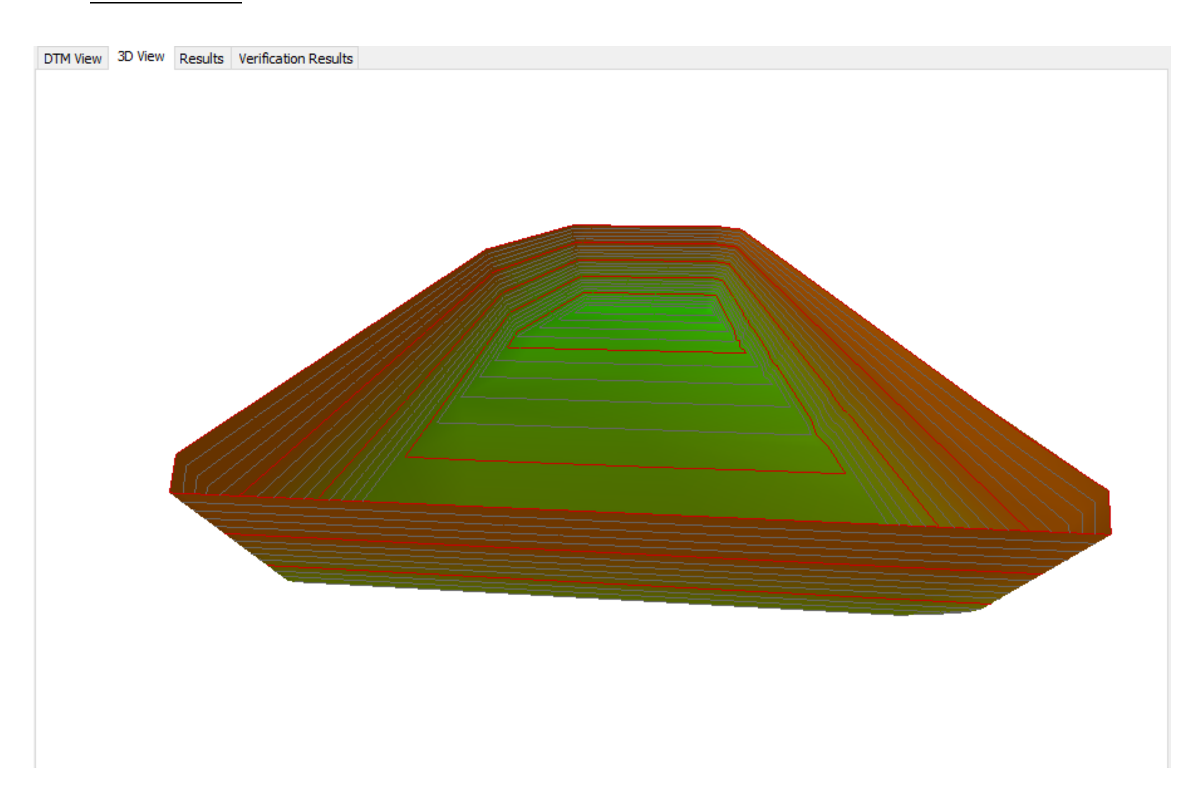


Figure 36: géométrie de la digue à une pente 1%

pente %	chicanes	durée 1ère récupération en jr	% récupéré par 30 jrs	durée de saturation
1	sans	66	52,4933317	6 ans 28 jours

Figure 37: résultats de récupération d'eau de la digue à une pente 1%

On constate également que cette configuration du bassin n'est pas bénéfique vu que le taux de récupération ne dépasse pas 52%. Concernant la durée de la 1ère récupération, on constate qu'elle est bien inférieure à celle de la pente 0%, c'est normal vu l'existence d'une pente accélérant l'écoulement vers les points de collecte.

- ✓ Le bassin après saturation :



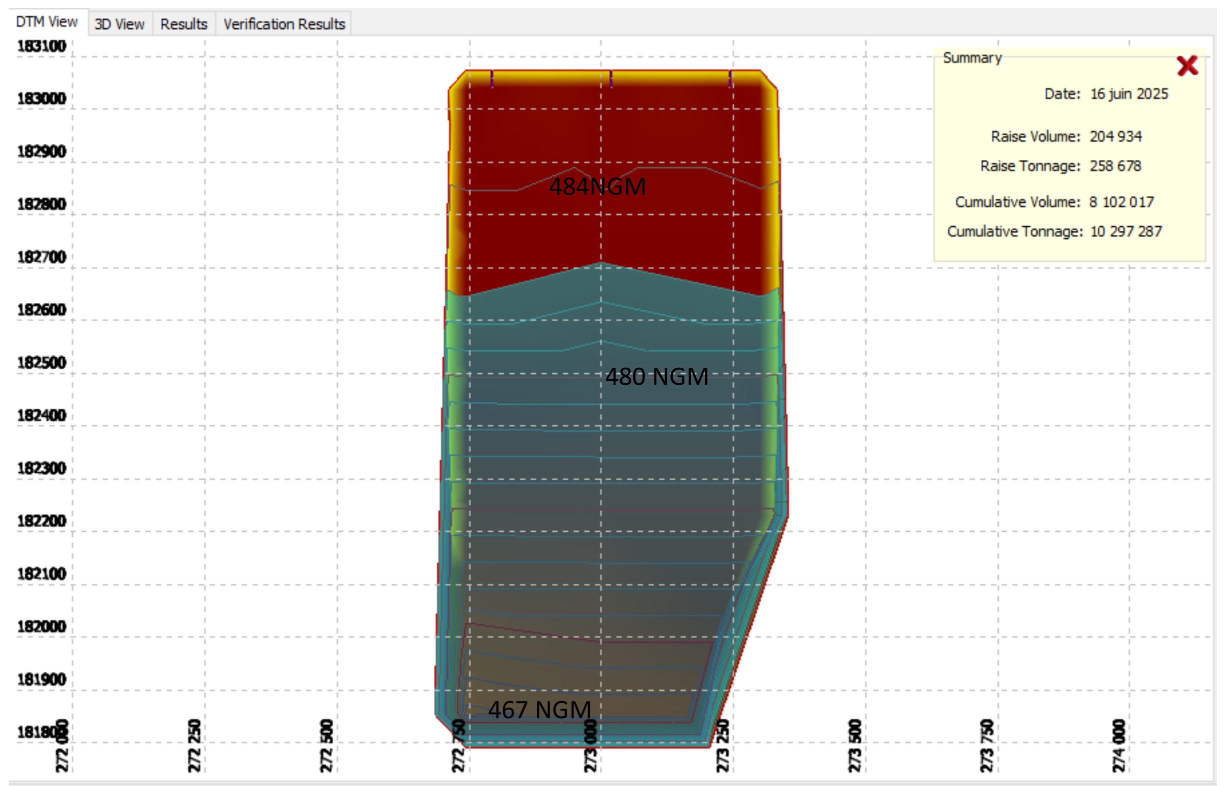


Figure 38: l'élévation de la boue après saturation de la digue à une pente 1%

Date:	16 juin 2025
Raise Volume:	204 934
Raise Tonnage:	258 678
Cumulative Volume:	8 102 017
Cumulative Tonnage:	10 297 287

volume total du bassin m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
13 490 708,93	8 102 017,00	60,06

Tableau 15: taux de stockage de la digue à une pente 1%

On constate que cette configuration nous donne une augmentation du taux de stockage par rapport à la première configuration, et c'est dû à l'effet de la pente qui donne une énergie cinétique aux particules solides pour avancer vers l'avant et gagner plus de volume dans le bassin.



vitesse d'écoulement (m/s)	longueur du bassin (m)	temps de séjour (min)
0,82	1182,4	24,1

Tableau 16: temps de séjour de l'eau pour une pente 1%

Le temps de séjour a diminué vu l'existence de la pente. En fait, cette valeur est très faible, et on conclut qu'il y'aura une érosion forte sur tout le bassin et l'eau récupérée est turbide en particules solides fines.

- ✓ L'élévation du bassin en longueur après saturation :

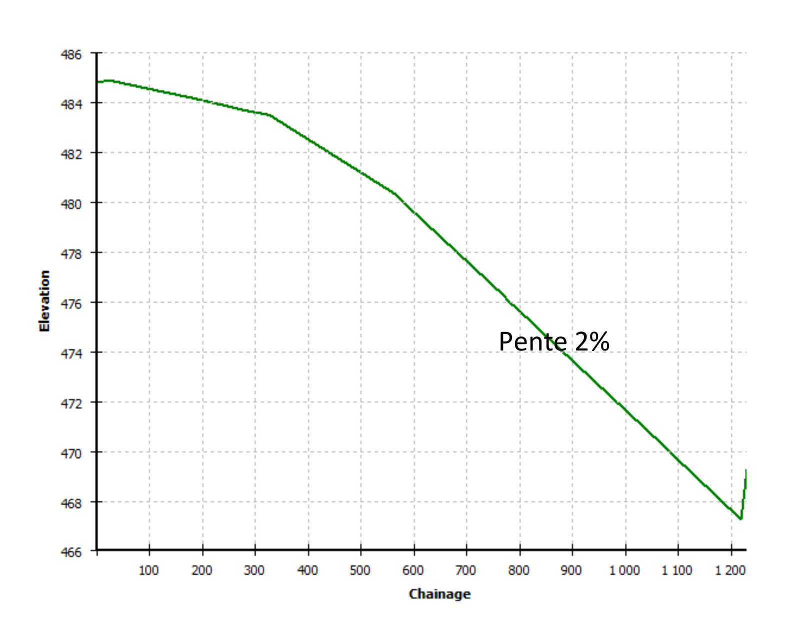


Figure 39: L'élévation du bassin en longueur après saturation 1%

On constate également que la boue consolidée et drainée n'est pas bien répartie, en fait, la boue se décante sur tout le bassin mais il y a toujours ce problème de décantation auprès des entrées, ce qui explique encore la valeur médiocre du pourcentage de stockage.

- ✓ L'élévation en largeur à l'entrée :



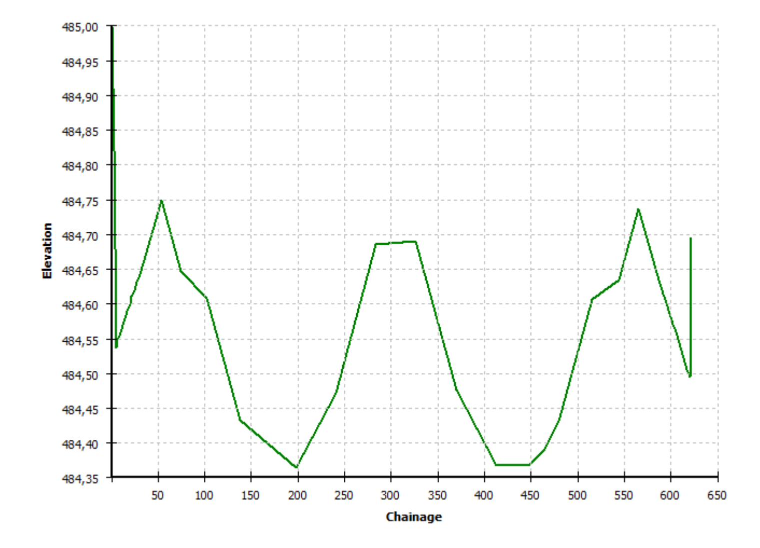


Figure 40: L’élévation du bassin en largeur à l’entrée après saturation 1%

On constate également qu’il y a une irrégularité concernant la distribution de la boue en largeur, ce problème est dû au jet dispersif à partir des 3 entrées et leur mauvaise disposition. Les trois sommets correspondent aux trois entrées fixées.

- ✓ <u>L’élévation en largeur à la sortie :</u>

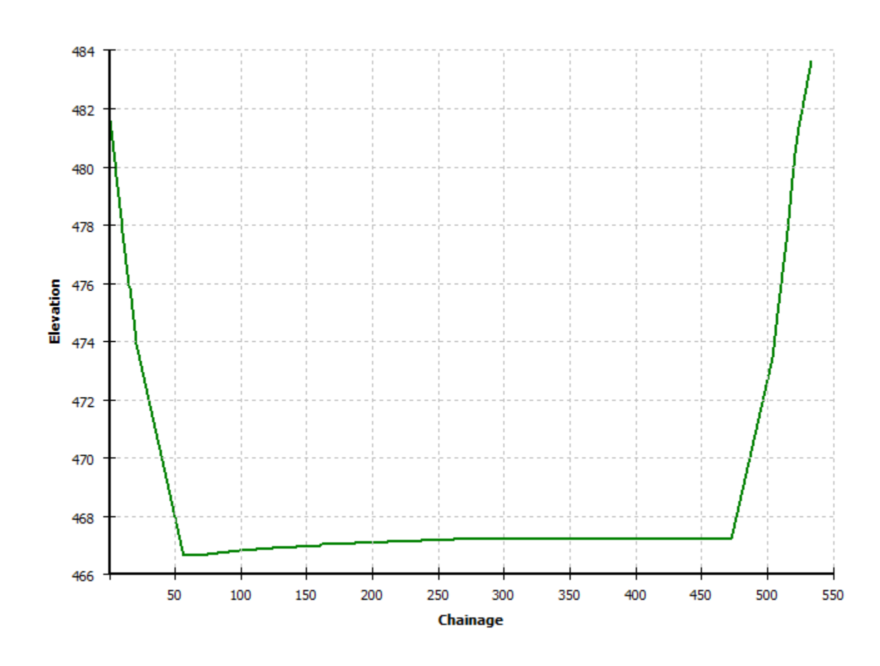


Figure 41: l’élévation en largeur à la sortie à une pente 1‰

La cote de la boue à la sortie arrive à 467 NGM et le terrain naturel est à 460,17 NGM, donc on aura une élévation de 6.83 m de solide à la sortie.



Ce scenario est mieux que les deux premiers, mais il n'est pas encore optimal, le pourcentage de stockage et de récupération sont encore faible.

4. Scenario 4 : Digue d'épandage à pente 2% sans chicanes

- ✓ Géométrie :

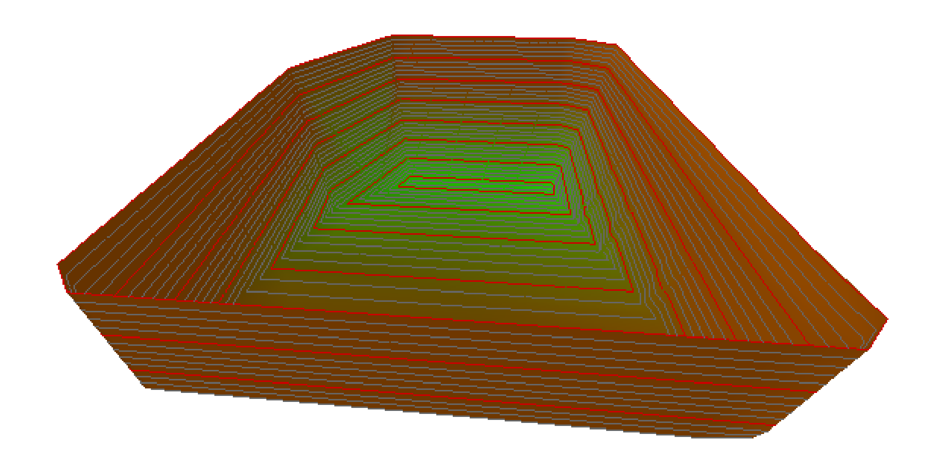


Figure 42: géométrie de la digue à une pente 2%

pente %	chicanes	durée 1ère récupération en jr	% récupéré par mois	durée de saturation
2	sans	58	71,91	10 ans 11 mois 21 jours

Tableau 17: résultats de récupération d'eau de la digue à une pente 2%

On constate que cette configuration du bassin nous donne un taux de récupération intéressant. Concernant la durée de la 1ère récupération, on constate qu'elle est bien inférieure à celle de la pente 0%, c'est normal vu l'existence d'une pente accélérant l'écoulement vers les points de collecte.

- ✓ Le bassin après saturation :



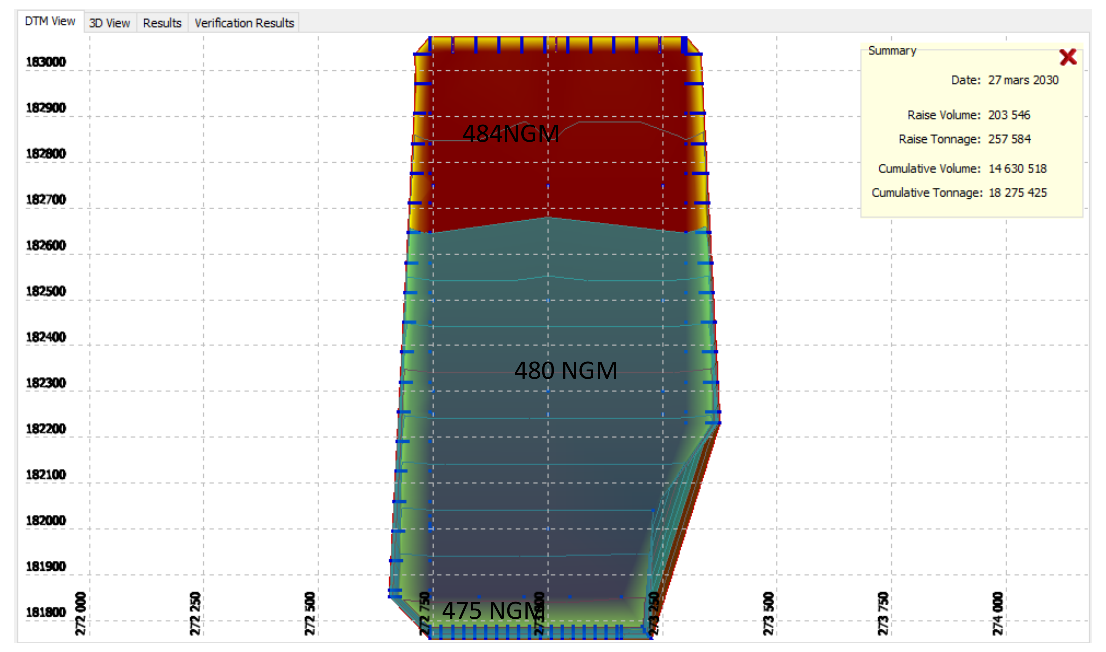


Figure 43: l'élévation de la boue après saturation de la digue à une pente 2%

Date: 27 mars 2030

Raise Volume: 203 546

Raise Tonnage: 257 584

Cumulative Volume: 14 630 518

Cumulative Tonnage: 18 275 425

volume total du bassin m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
18 498 800,17	14 630 518,00	79,09

Tableau 18: taux de stockage de la digue à une pente 2%

On constate que cette configuration nous donne une augmentation du taux de stockage par rapport à la première configuration, et c'est dû à l'effet de la pente qui donne une énergie cinétique aux particules solides pour avancer vers l'avant et gagner plus de volume dans le bassin.

vitesse d'écoulement (m/s)	longueur du bassin (m)	temps de séjour (min)
1,16	1182,4	17



Tableau 19: temps de séjour de l'eau pour une pente 2%

Le temps de séjour a diminué vu l'existence de la pente. La valeur du temps de séjour a encore diminuée donc l'eau récupérée à la sortie est de mauvaise qualité.

- ✓ L'élévation du bassin en longueur après saturation :

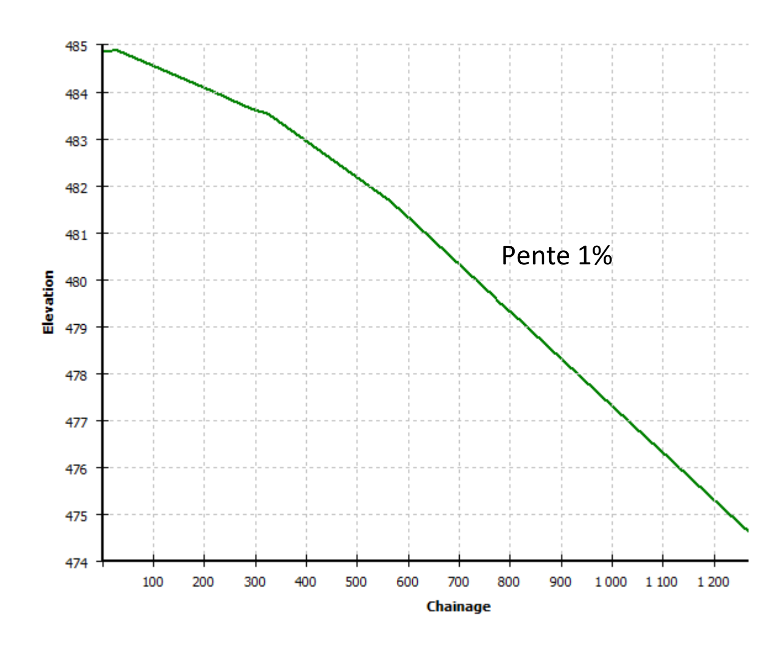


Figure 44: L'élévation du bassin en longueur après saturation 2%

On constate que cette configuration est très intéressante en terme de stockage, on arrive à stocker la boue sur les 4/5 du bassin (environ 80% du total du bassin).

- ✓ L'élévation en largeur à l'entrée :

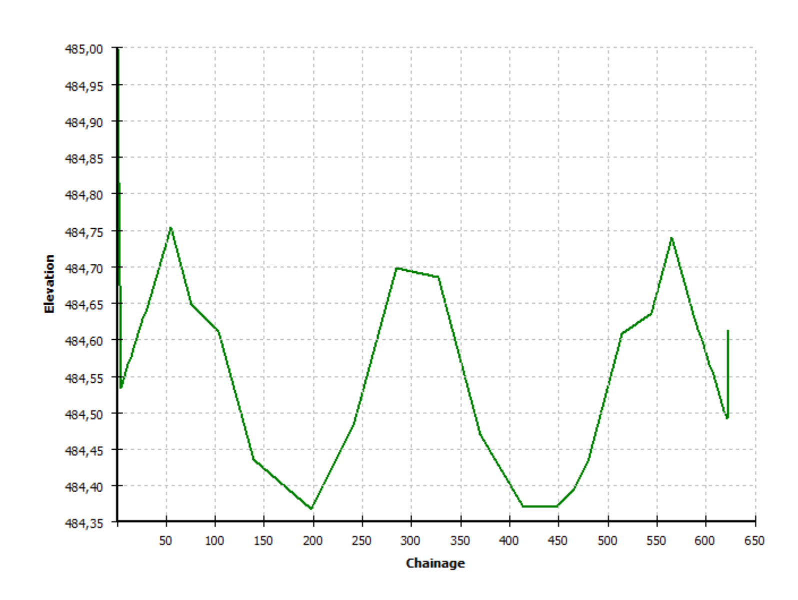




Figure 45: L'élévation du bassin en largeur à l'entrée après saturation2%

On constate également qu'il y a une irrégularité concernant la distribution de la boue en largeur, ce problème est dû au jet dispersif à partir des 3 entrées et leur mauvaise disposition. Les trois sommets correspondent aux trois entrées fixées.

- ✓ L'élévation en largeur à la sortie :

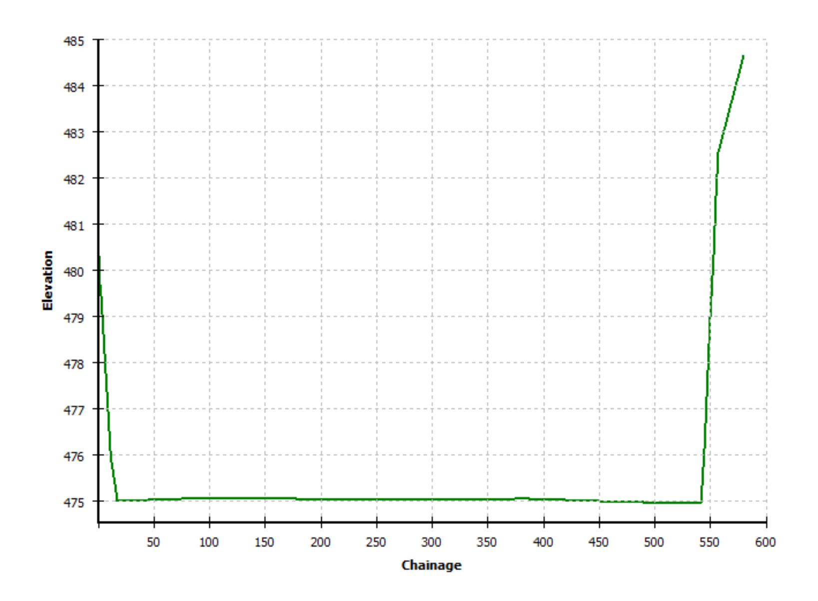


Figure 46: l'élévation en largeur à la sortie à une pente 2%

La cote de la boue à la sortie arrive à 475 NGM et le terrain naturel est à 448,35 NGM, donc on aura une élévation de 26,65 m de solide à la sortie. Ce qui montre la répartition plus ou moins bonne de la boue sur tout le volume du bassin.

➡ Ce scenario est mieux que les premiers, on peut dire qu'il est optimal, le pourcentage de stockage et de récupération sont bons et le temps de séjour est moyen.

- on constate que pour les scenarios précédents, on avait le problème de la pente raide en longueur qui engendre une récupération de l'eau d'une qualité mauvaise, d'où on a pensé à introduire des chicanes qui vont jouer le rôle d'un obstacle afin de limiter l'effet de la pente et augmenter le temps de séjour pour avoir une eau claire à la sortie.

5. Description des chicanes utilisées :

	hauteur m	longueur m	épaisseur au sommet m	distance entre axes des chicanes m	Empattement m
4 chicanes	6	278,2	0,30	236,48	3

Tableau 20: description des chicanes utilisées

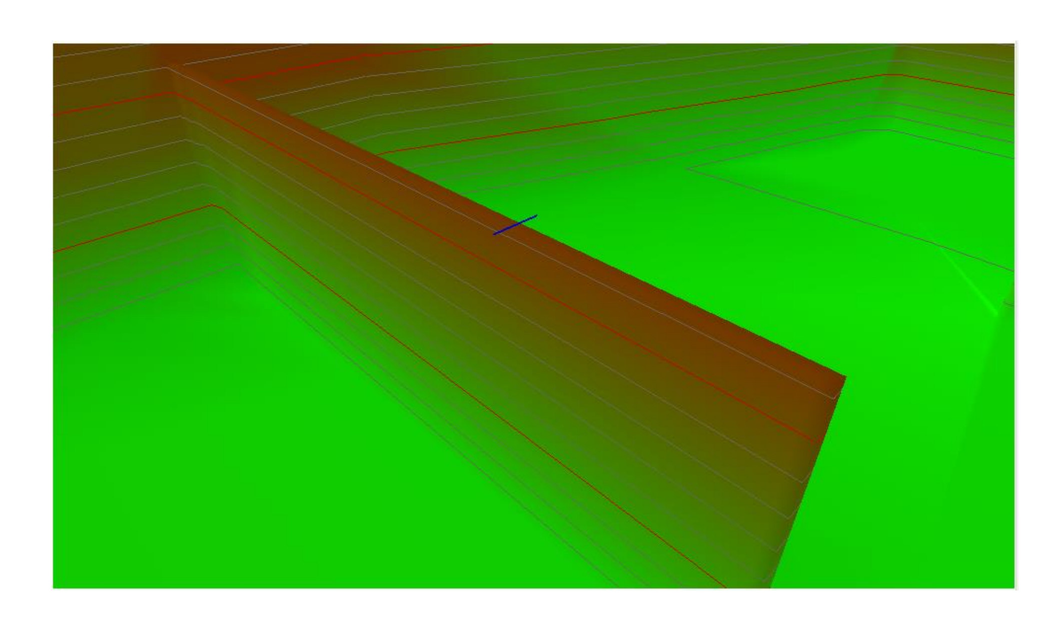


Figure 47: vue en 3D d'une chicane

6. Scenario 5 : Digue d'épandage à pente 1‰ avec introduction des chicanes

- ✓ Géométrie :

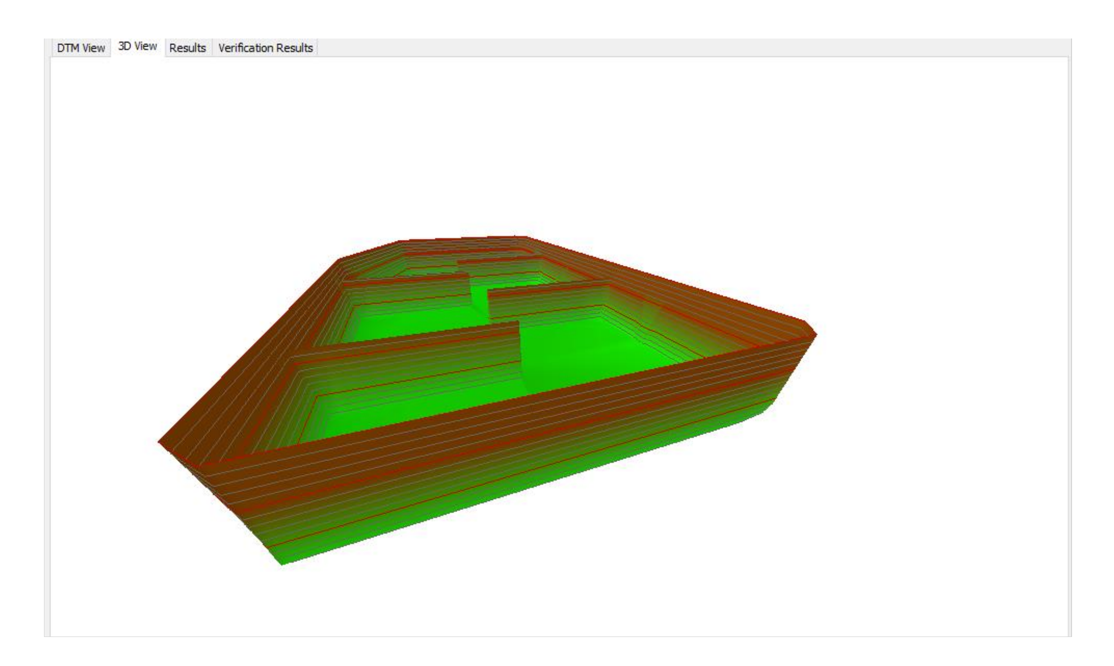




Figure 48: géométrie de la digue à une pente 1‰ avec chicanes

pente %	chicanes	durée 1ère récupération en jr	% récupéré par 30 jrs	durée de saturation
1‰	avec	56	48,44086534	4 ans 5 mois 11 jrs

Figure 49: résultats de récupération d'eau de la digue à une pente 1‰ avec chicanes

On constate que cette configuration du bassin nous donne un taux de récupération meilleur que celui trouvé pour la même pente et sans chicanes, mais il est encore médiocre. L'effet des chicanes se manifeste en temps de la 1ère récupération qui a augmenté de 11 jours par rapport à la même pente et sans introduction des chicanes.

✓ <u>Le bassin après saturation :</u>

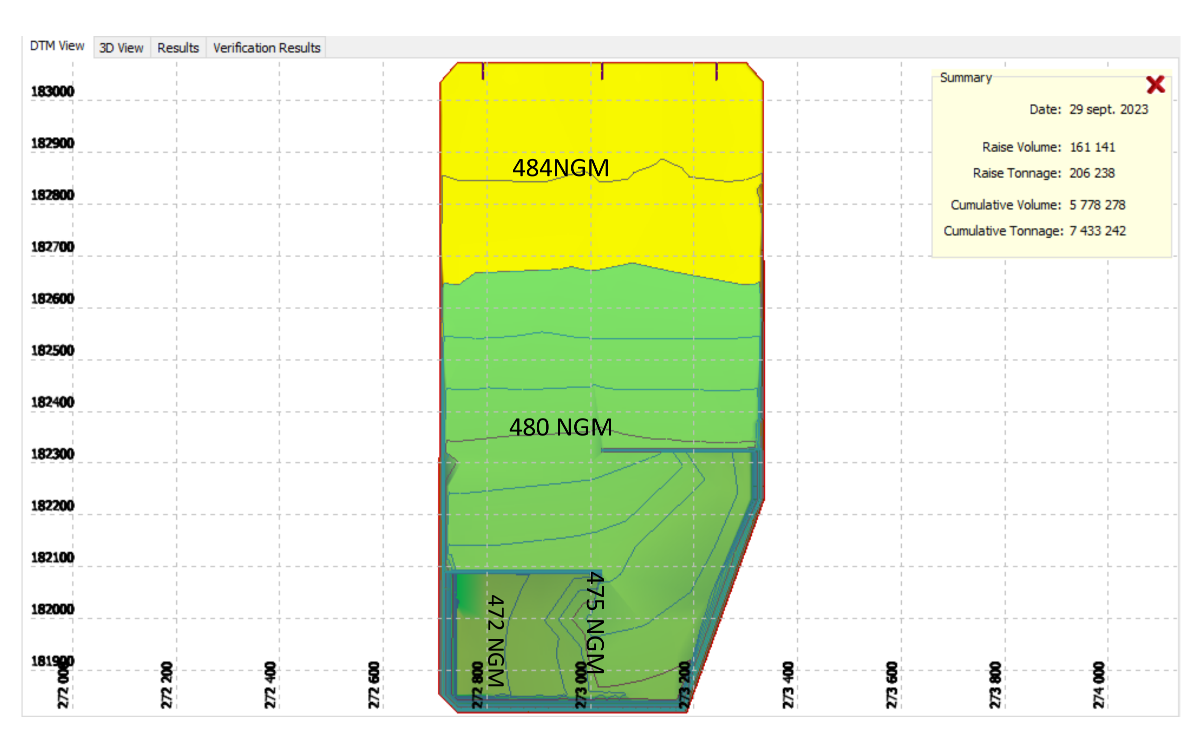


Figure 50: l'élévation de la boue après saturation de la digue à une pente 1‰ avec chicanes

Date: 29 sept. 2023

Raise Volume: 161 141

Raise Tonnage: 206 238

Cumulative Volume: 5 778 278

Cumulative Tonnage: 7 433 242



volume total du bassin m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
9 392 706,95	5 778 278,00	61,52

Tableau 21: taux de stockage de la digue à une pente 1‰ avec chicanes

On constate que cette configuration nous donne un taux de stockage inférieur à celui trouvé pour la même pente sans chicanes 66%, ça s'explique par l'effet d'obstacle joué par les chicanes, ces derniers diminuent la dispersion des particules solides, d'où la perte en stockage dans les 600 m derniers.

✓ <u>Longueur approximative parcourue:</u>

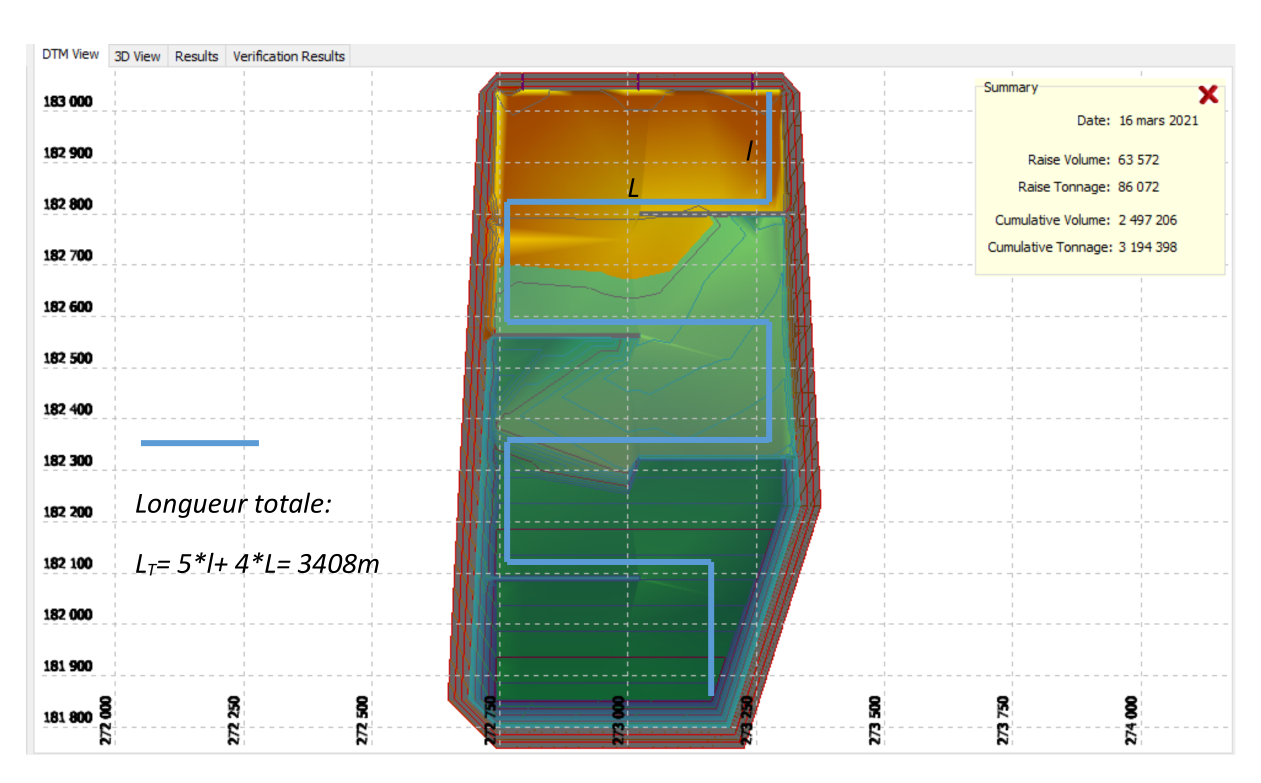


Figure 51: longueur approximative parcourue en cas d'introduction des chicanes

vitesse d'écoulement (m/s)	longueur parcourue (m)	temps de séjour (heure)
0,26	3408	3,65

Tableau 22: temps de séjour de l'eau pour une pente 1‰ avec chicanes

Le temps de séjour a augmenté par rapport à la configuration 1‰ sans chicanes, et c'est dû à l'introduction des chicanes qui augmentent le temps qu'une goutte d'eau passera dans le bassin afin d'avoir une auto-purification et récupérer une eau claire aux points de collecte.



✓ L'élévation du bassin en longueur après saturation :

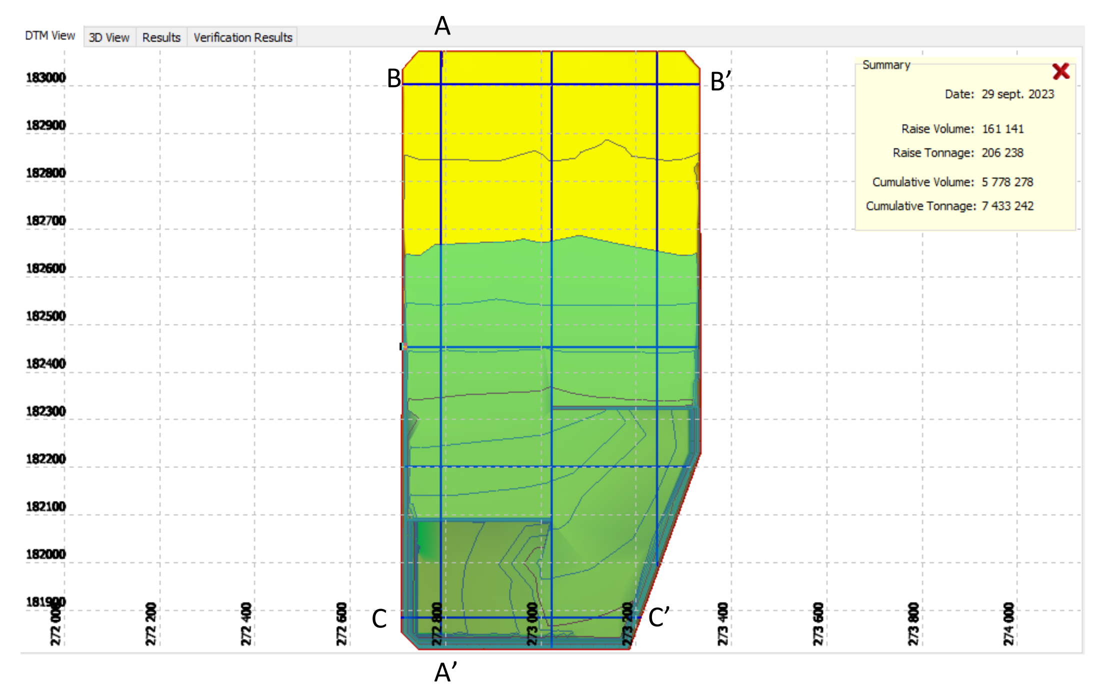


Figure 52: L'élévation du bassin en longueur après saturation 1‰

➢ suivant la ligne contenant la premiére entrée coupe A-A' :

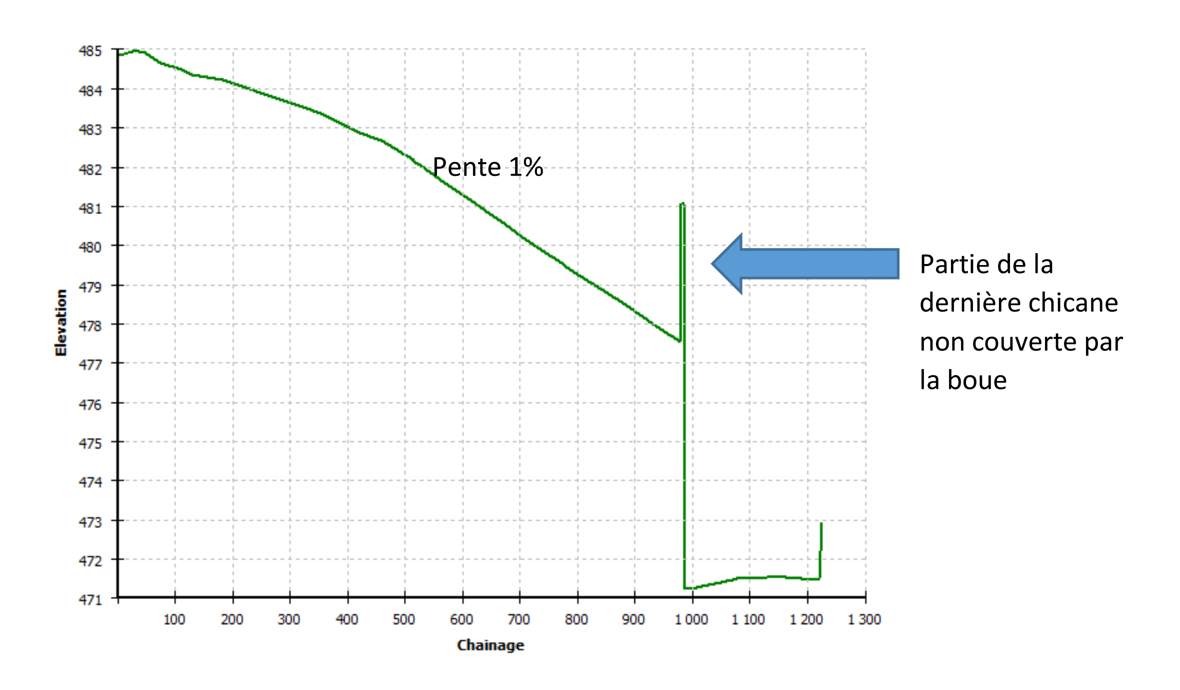


Figure 53: l'élévation en longueur du bassin après saturation à une pente de 1‰ avec chicanes

On constate que cette configuration est très intéressante en terme de diminution des vitesses par les chicanes, donc on a résolu le problème de la pente raide de 1%, mais on a diminué également l'aspect dispersif de solide, ce qui explique la partie presque non exploitable par la boue après la chicane sur le graphe.



✓ L'élévation en largeur à l'entrée coupe B-B' :

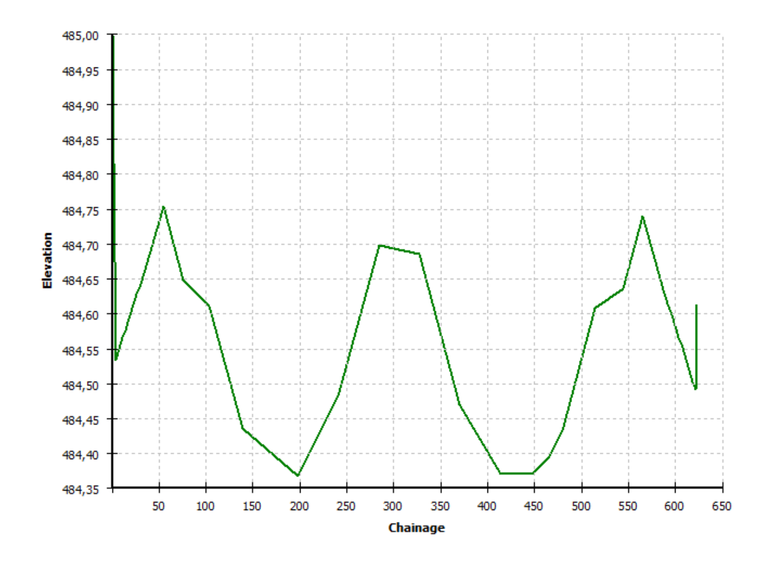


Figure 54: L'élévation du bassin en largeur à l'entrée après saturation 1‰

On constate également qu'il y a une irrégularité concernant la distribution de la boue en largeur à l'entrée, ce problème est dû au jet dispersif à partir des 3 entrées et leur mauvaise disposition. Les trois sommets correspondent aux trois entrées fixées.

✓ L'élévation en largeur à la sortie coupe C-C' :

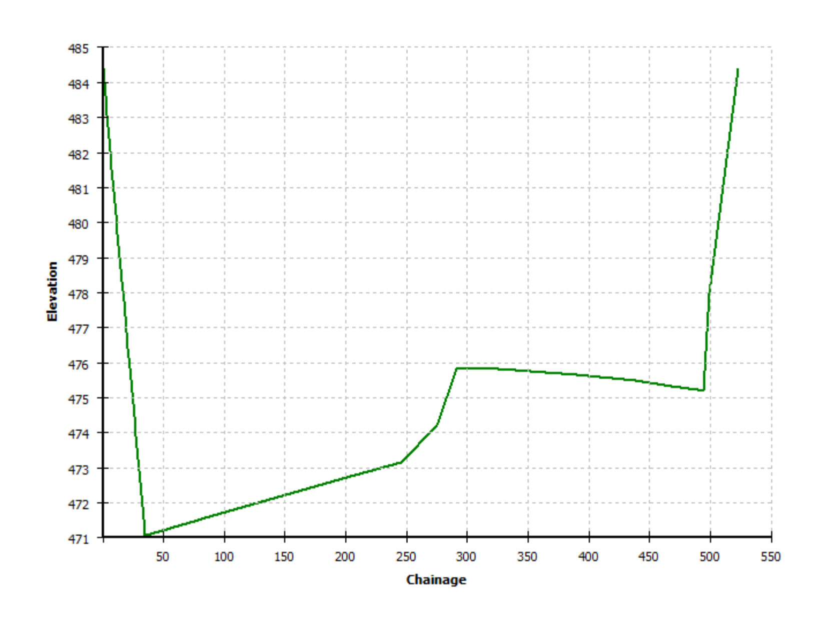


Figure 55: l'élévation en largeur à la sortie à une pente 1‰

Cette coupe nous explique pourquoi le taux de récupération pour cette configuration est faible, on constate qu'un volume non négligeable va être stagnant dans la partie gauche du bassin loin des points de récupération (voir les points de collecte sur les plans ci joint).



➡ Ce scenario est à éviter.

7. Scenario 6: Digue d'épandage à pente 1% avec introduction des chicanes

✓ Géométrie :

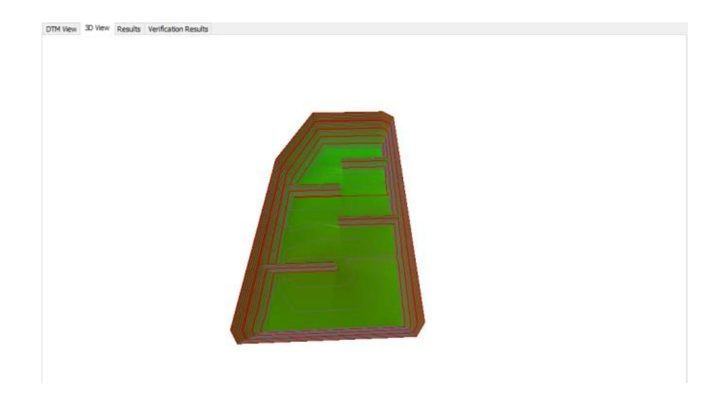


Figure 56: géométrie de la digue à une pente 1%

pente %	chicanes	durée 1ère récupération en jr	% récupéré par 30 jrs	durée de saturation
1	avec	51	76,18	6 ans 28 jours

Tableau 23: résultats de récupération d'eau de la digue à une pente 1% avec chicanes

On constate que cette configuration du bassin nous donne un taux de récupération meilleur que celui trouvé pour la même pente et sans chicanes. On constate également la diminution du temps de la 1ère récupération.

✓ Le bassin après saturation :



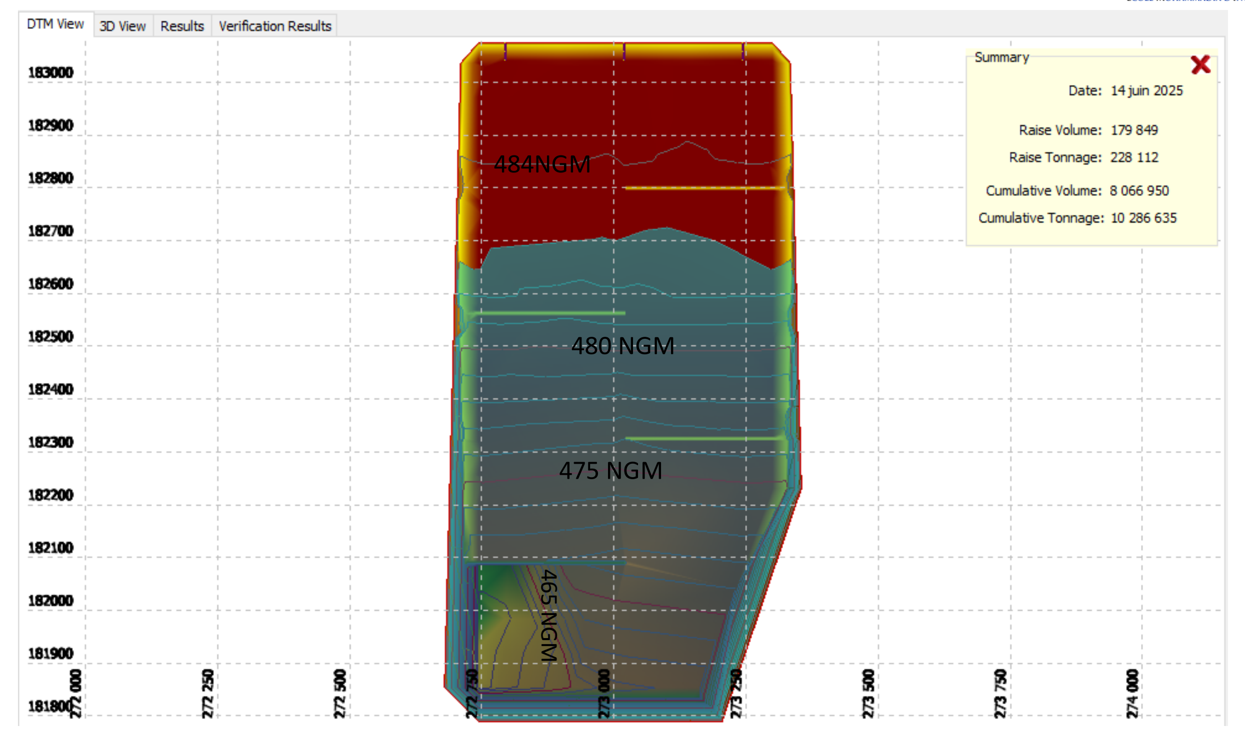


Figure 57: l'élévation de la boue après saturation de la digue à une pente 1% avec chicanes

Date: 14 juin 2025

Raise Volume: 179 849

Raise Tonnage: 228 112

Cumulative Volume: 8 066 950

Cumulative Tonnage: 10 286 635

volume total du bassin m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
13 806 062,07	8 066 950,00	58,43

Tableau 24: taux de stockage de la digue à une pente 1% avec chicanes

On constate que cette configuration nous donne un taux de stockage proche à celui trouvé pour la même pente sans chicanes 60%.

vitesse d'écoulement (m/s)	longueur du bassin (m)	temps de séjour (min)
0,82	3408	69,35

Tableau 25: temps de séjour de l'eau pour une pente 1% avec chicanes



Le temps de séjour a augmenté par rapport à la configuration 1% sans chicanes, et c'est du à l'introduction des chicanes qui augmentent le temps qu'une goutte d'eau passera dans le bassin afin d'avoir une auto-purification et récupérer une eau claire aux points de collecte.

- ✓ L'élévation du bassin en longueur après saturation :

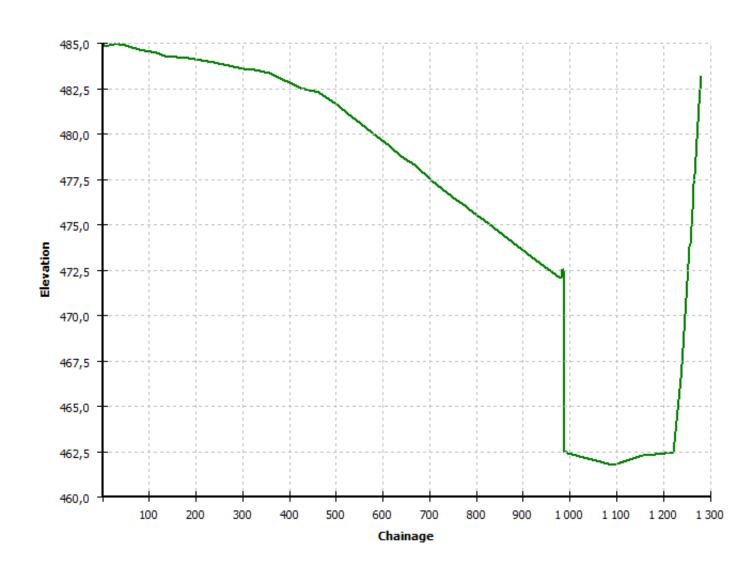


Figure 58: L'élévation du bassin en longueur après saturation 1% avec chicanes

Le graphe nous montre la cause derrière le faible pourcentage de stockage pour cette configuration, en fait le volume derrière la dernière chicane n'est pas exploité.

- ✓ L'élévation en largeur à l'entrée:

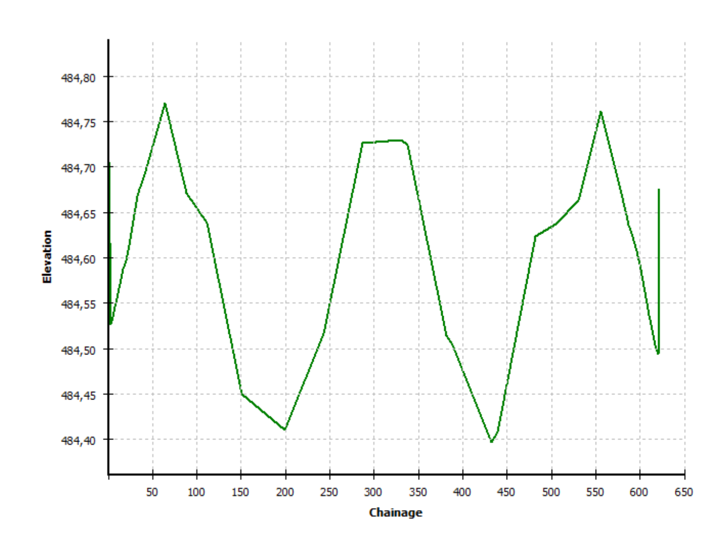


Figure 59: L'élévation du bassin en largeur à l'entrée après saturation 1% avec chicanes



On constate qu’on a toujours ce problème de la répartition non uniforme en largeur de la boue à l’entrée du bassin, ce problème va être résolu après quand on trouvera la meilleur configuration en terme de stockage et récupération de l’eau.

- ✓ L’élévation en largeur à la sortie :

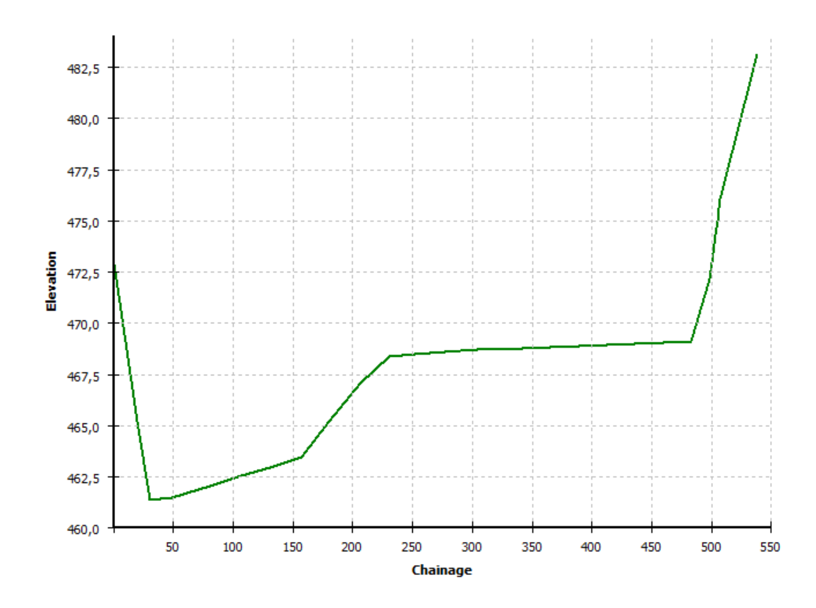


Figure 60: l’élévation en largeur à la sortie à une pente 1% avec chicanes

Le problème de la répartition non uniforme de la boue à la sortie du bassin est résolu par la multiplication des points de collecte, en fait il y a 3 points de collecte sur le côté sud du bassin espacés de 100 m et le quatrième existe sur le côté nervure.

8. Scenario 7 : Digue d’épandage à pente 2% avec introduction des chicanes

- ✓ Géométrie :



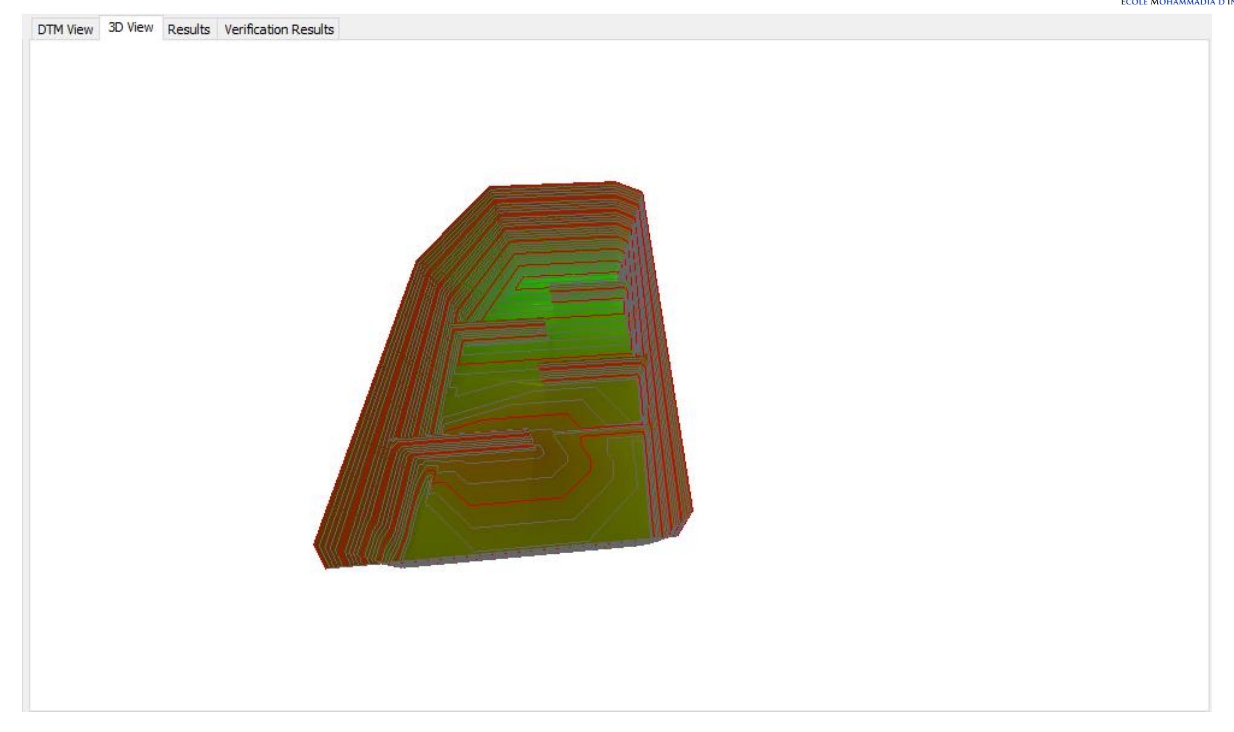


Figure 61: géométrie de la digue à une pente 2% avec chicanes

pente %	Chicanes	durée 1ère récupération en jr	% récupéré par mois	durée de saturation
2	Avec	40	88,8	11 ans 4 mois 22 jours

Figure 62: résultats de récupération d'eau de la digue à une pente 2% avec chicanes

Cette configuration nous donne un pourcentage très élevé concernant la récupération de l'eau et la durée de saturation est la meilleure parmi les scenarios étudiés, la durée de la 1ère récupération est bonne en comparaison avec les autres scenarios.



- ✓ Le bassin après saturation :

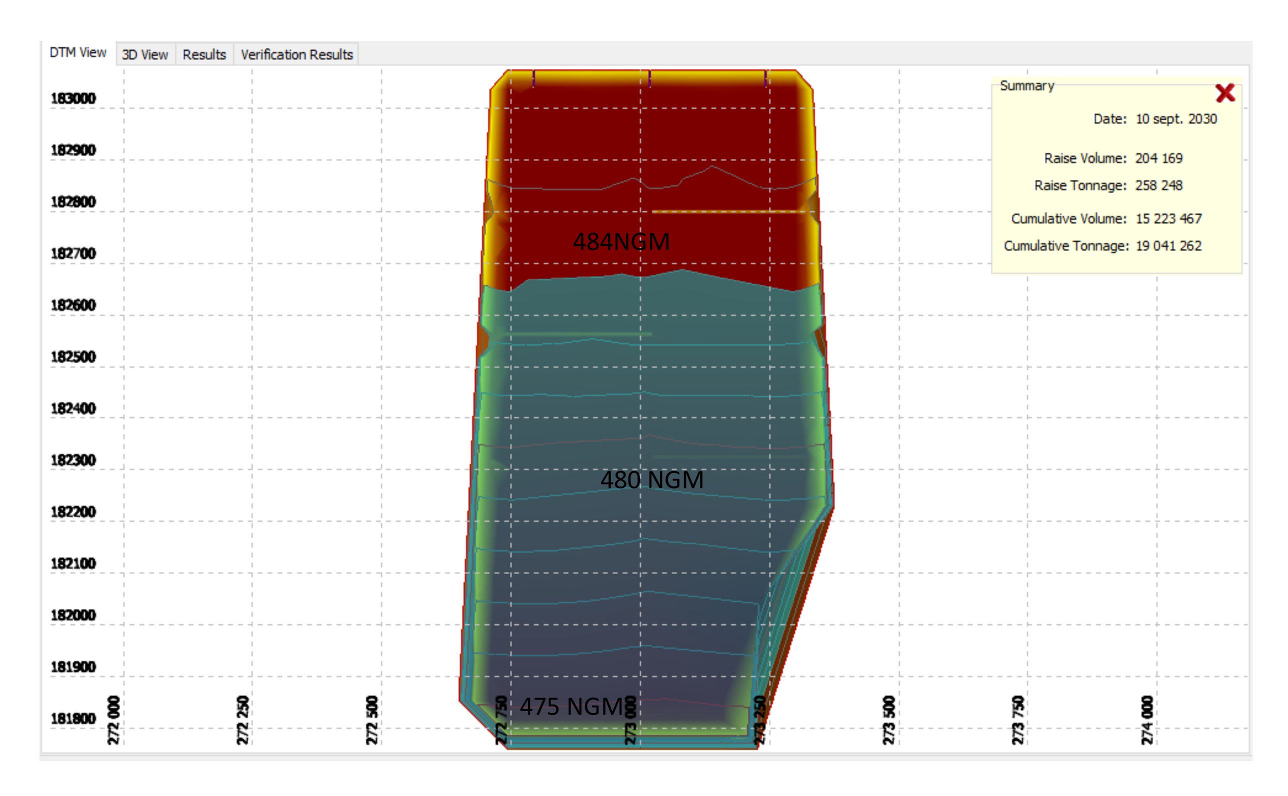


Figure 63: l'élévation de la boue après saturation de la digue à une pente 2% avec chicanes

Date: 10 sept. 2030

Raise Volume: 204 169

Raise Tonnage: 258 248

Cumulative Volume: 15 223 467

Cumulative Tonnage: 19 041 262

volume total du bassin m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
19 211 431,80	15 223 467,00	79,24

Tableau 26: taux de stockage de la digue à une pente 2% avec chicanes

On constate que le pourcentage de stockage est intéressant en comparaison avec les scenarios précédents.



vitesse d'écoulement (m/s)	longueur du bassin (m)	temps de séjour (min)
1,16	3408	49

Tableau 27: temps de séjour de l'eau pour une pente 2% avec chicanes

- ✓ L'élévation du bassin en longueur après saturation :

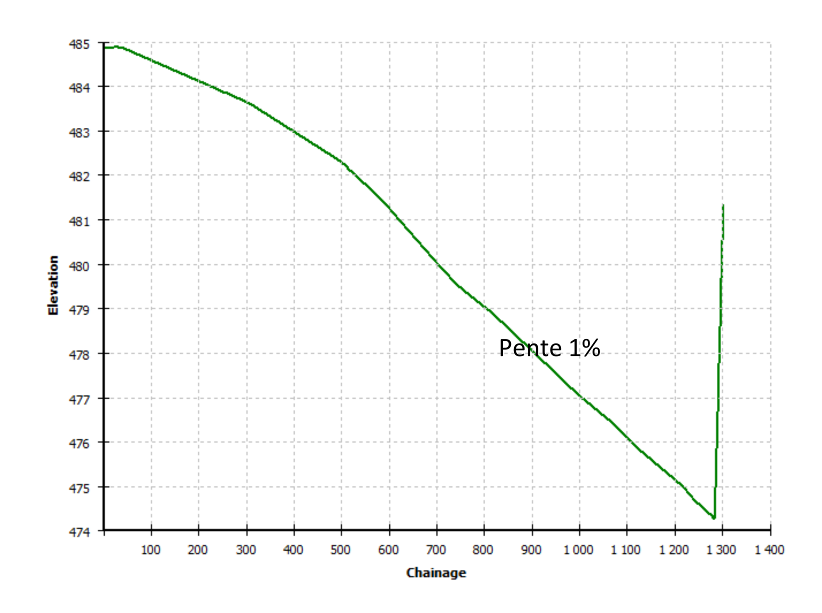


Figure 64: L'élévation du bassin en longueur après saturation 2% avec chicanes

On constate que la boue prend une répartition uniforme en longueur et que les chicanes sont toutes couvertes de la boue ce qui montre l'aspect dispersif fort de la boue renforcé par la pente.

- ✓ L'élévation en largeur à l'entrée :

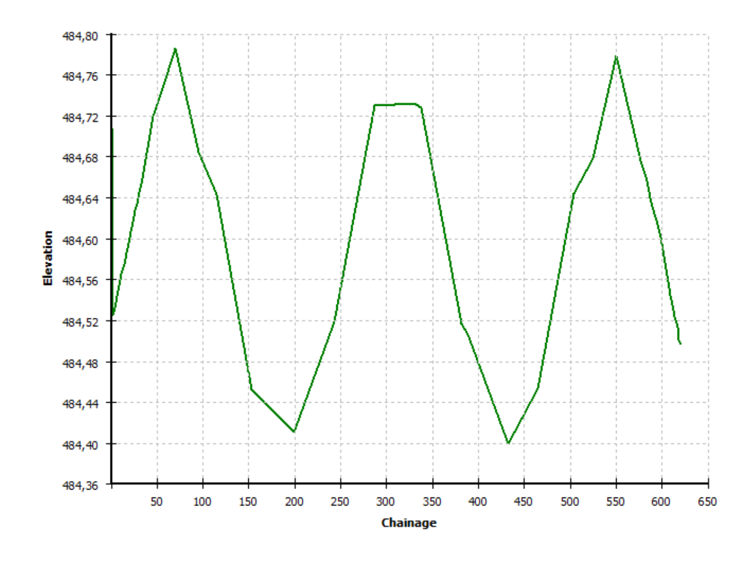


Figure 65: L'élévation du bassin en largeur à l'entrée après saturation 2% avec chicanes



On constate que le problème de la répartition non uniforme de la boue à l'entrée existe toujours.

✓ L'élévation en largeur à la sortie :

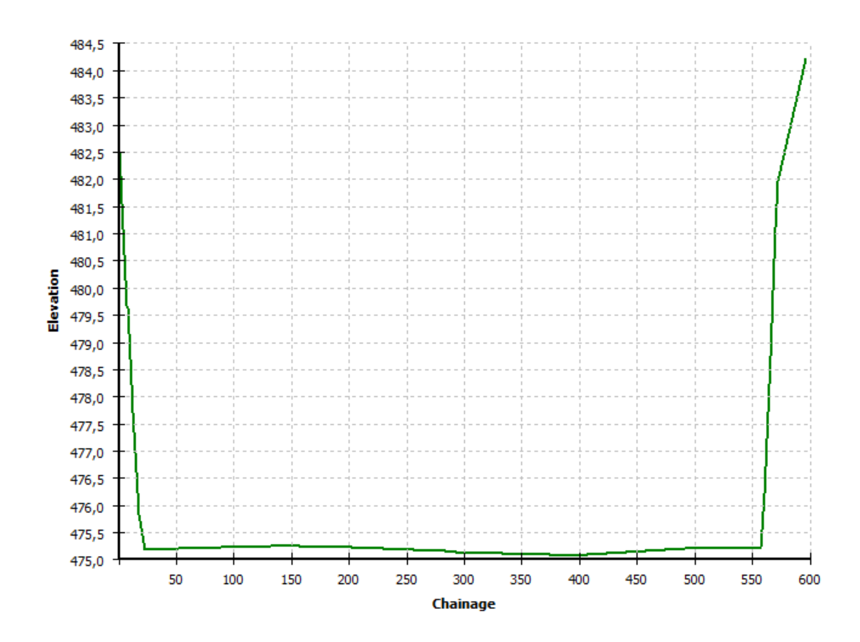


Figure 66: l'élévation en largeur à la sortie à une pente 2% avec chicanes

On constate que la répartition de la boue est uniforme à la sortie du bassin et l'élévation importante de la boue qui arrive à 27m de hauteur par rapport au terrain naturel.

9. Conclusion :

A partir des statistiques calculées, on conclut que le meilleur scenario est celui de la configuration du bassin avec une pente de 2% avec introduction des 4 chicanes, on constate également que la répartition de la boue en longueur est bonne mais la répartition de la boue à l'entrée du bassin en largeur n'est pas uniforme, c'est pourquoi on a pensé d'ajouter 2 entrées au droit des sections non saturées après la durée de saturation prévue pour cette configuration (voir le graphe suivant).



Elevation

Chainage

182m

431m

Figure 67: positions d'ajout des 2 entrées côté Nord

10. Amélioration du modèle optimal :

✓ Résultats de l’ajout des 2 entrées :



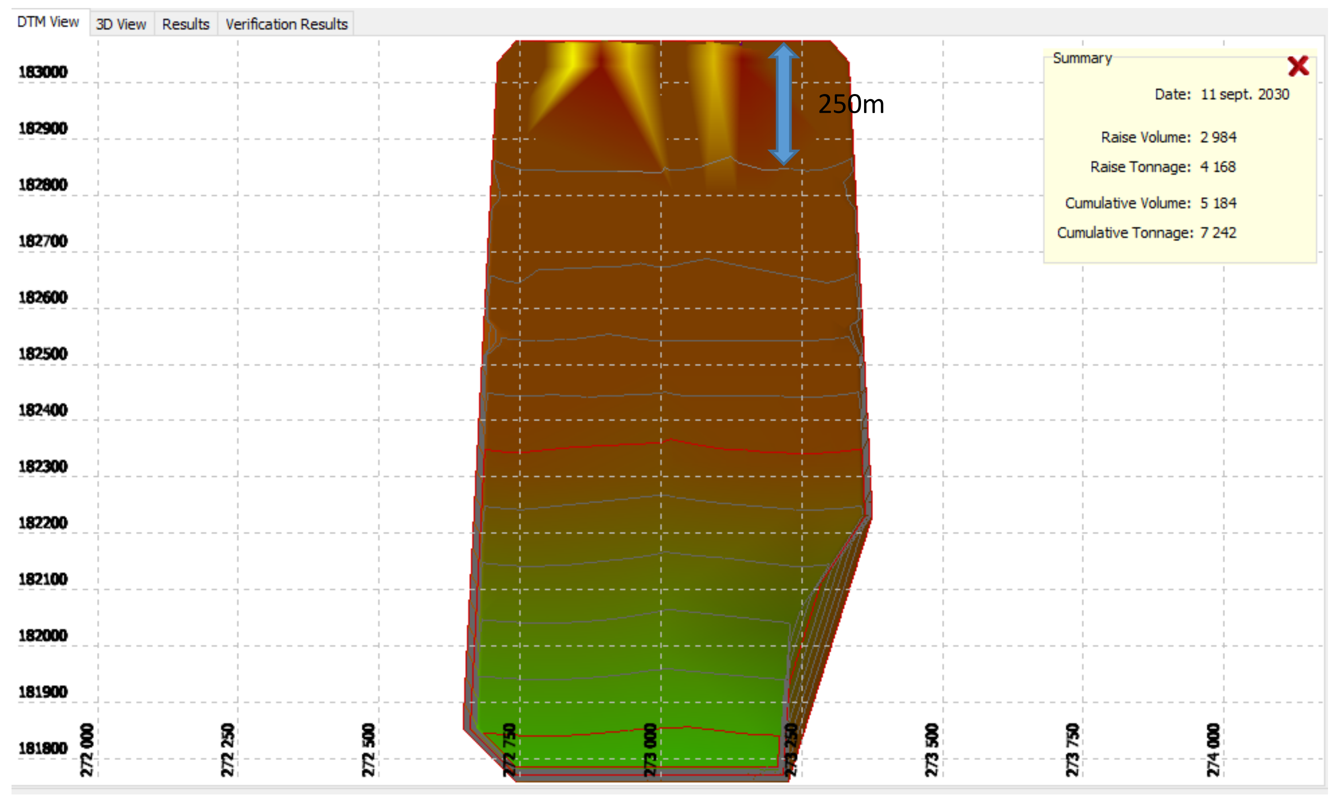


Figure 68: résultats de l'ajout des 2 entrées Nord sur l'élévation du bassin

Date:	11 sept. 2030
Raise Volume:	2 984
Raise Tonnage:	4 168
Cumulative Volume:	5 184
Cumulative Tonnage:	7 242

On constate que l'ajout des 2 entrées n'a pas eu un effet important concernant le volume de solide stockés vu que la hauteur à l'entrée où il y'avait le problème était de 0.5 m et sur une distance de 250m, après cette distance en longueur on trouve une pente bien uniforme.



✓ Coupe en largeur le 11 septembre 2030 :

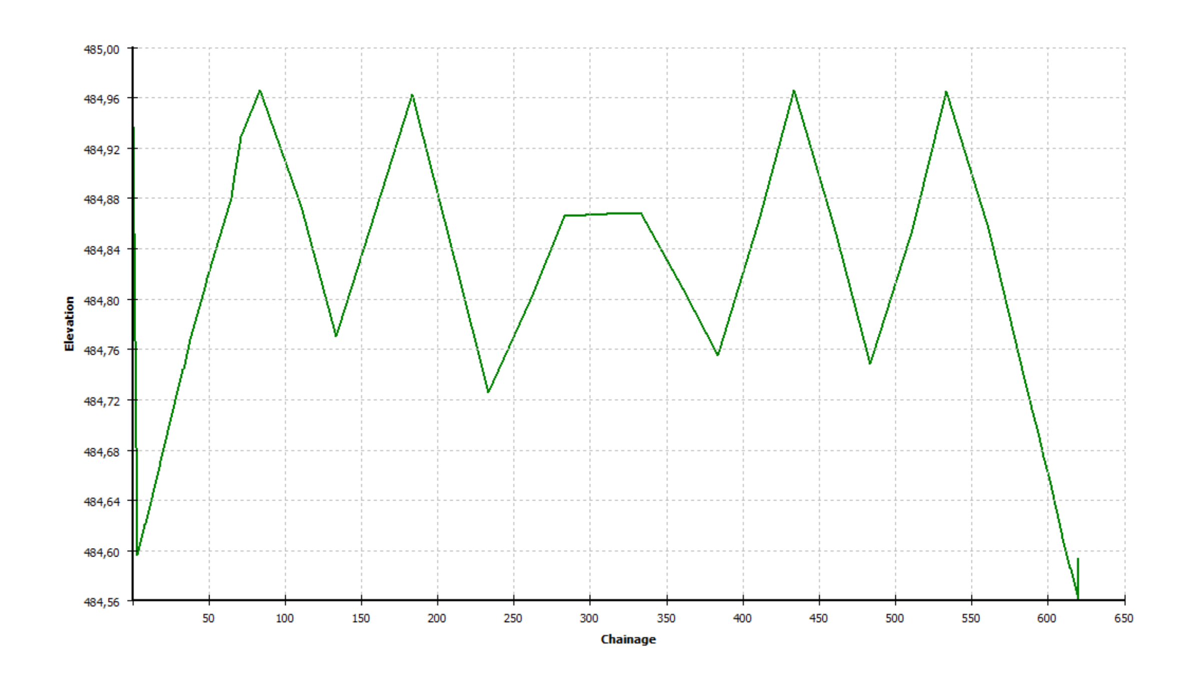


Figure 69: résultats de l'ajout des 2 entrées sur l'élévation du bassin en largeur à l'entrée

Vu qu'on ne gagne pas un volume intéressant en terme de stockage ou bien en terme de récupération d'eau, l'ajout des 2 entrées au côté nord du bassin est à éviter, et on va essayer l'ajout des entrées aux cotés EST et OUEST à une distance de 591m à partir du côté Nord du bassin c'est-à-dire à mi-distance en longueur.

✓ Les coordonnées des points de déposition

Tableau 28: coordonnées des 2 entrées Est et Ouest ajoutées

	x	y	z
Point EST	273311,4698	182442,8626	481
Point OUEST	272751,0119	182442,8626	481



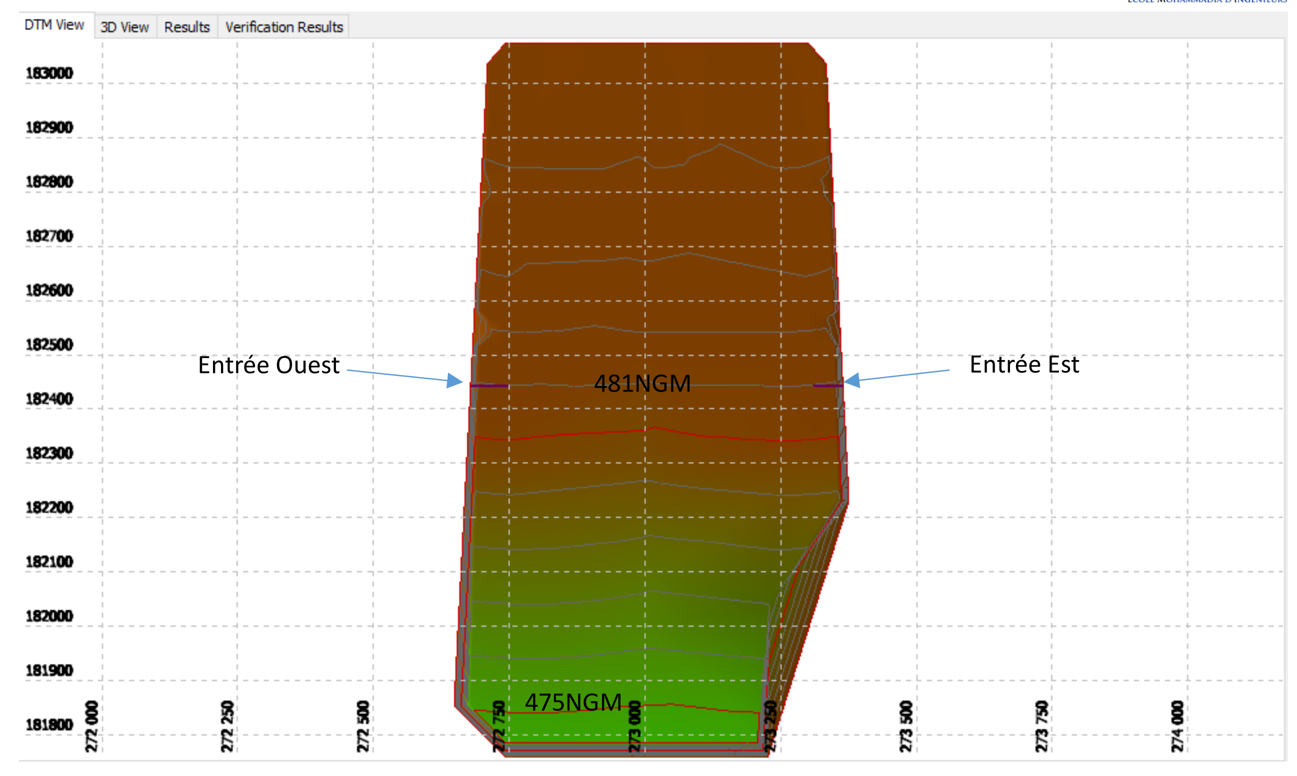


Figure 70: vue d'emplacement des 2 entrées

✓ <u>Présentation des résultats :</u>

durée 1ère récupération en jr	% récupéré par 30jrs	durée de saturation
17	92,56	1 ans 10 mois 26 jours

Tableau 29: résultats d'ajout des 2 entrées Est et Ouest

On constate que l'ajout des entrées nous a permet de gagner en terme d'exploitation de la digue d'épandage environ 2 ans de plus, et le taux de récupération qui est amélioré de 88,8% à 92,56%.



- ✓ Le bassin après saturation :

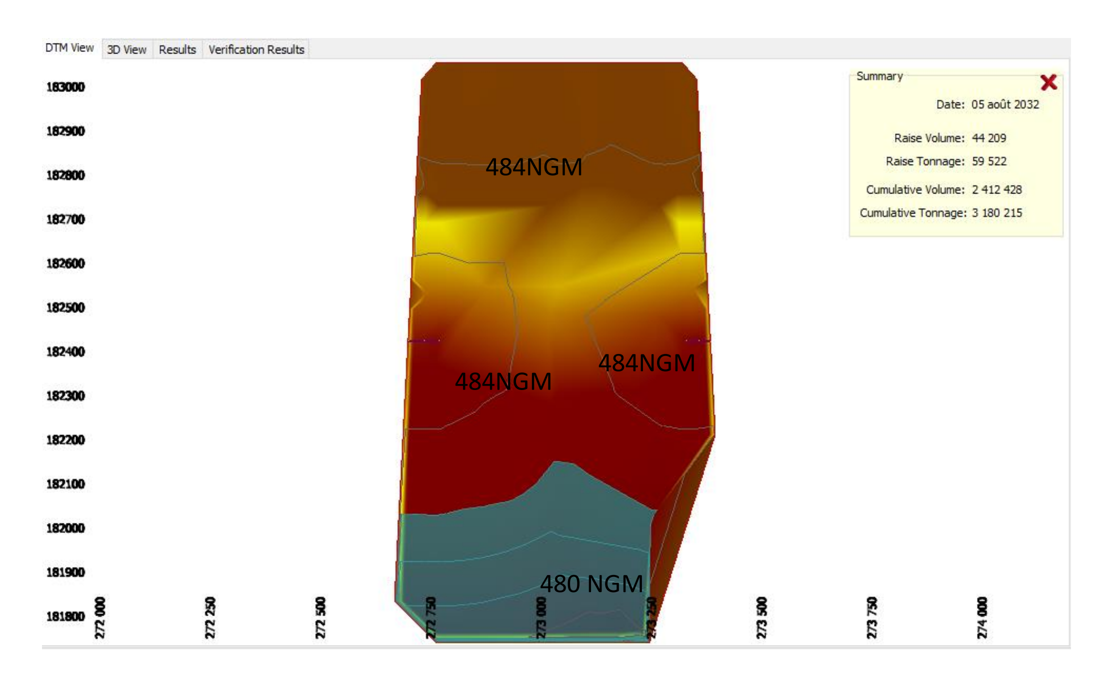


Figure 71: l'élévation de la boue après saturation de la digue et ajout des 2 entrées

Date:	05 août 2032
Raise Volume:	44 209
Raise Tonnage:	59 522
Cumulative Volume:	2 412 428
Cumulative Tonnage:	3 180 215

volume total du bassin avant l'ajout des entrées m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
3 714 792,62	2 412 428,00	64,94

Tableau 30: taux de stockage de la digue à une pente 2%

On constate que le pourcentage de stockage pour la quantité ajoutée par les 2 entrées est intéressant. Maintenant on calcule le pourcentage de stockage total :



volume total du bassin m^3	volume de solide stockée m^3	% de stockage
19 211 431,80	17 042 946,00	88,71

Tableau 31: taux de stockage de la digue à une pente 2% après ajout des 2 entrées

On constate que le pourcentage total de stockage a augmenté de 76,16% avant l'ajout des 2 entrées à 88,71% après l'ajout des 2 entrées.

vitesse d'écoulement (m/s)	longueur du bassin (m)	temps de séjour (min)
1,16	591,2	8,50

Tableau 32: temps de séjour de l'eau pour une pente 2% après ajout des 2 entrées

Le temps de séjour est faible vu la distance courte parcouru entre les 2 entrées et les points de collecte et la pente assez raide construite après déposition (pente de 2%).

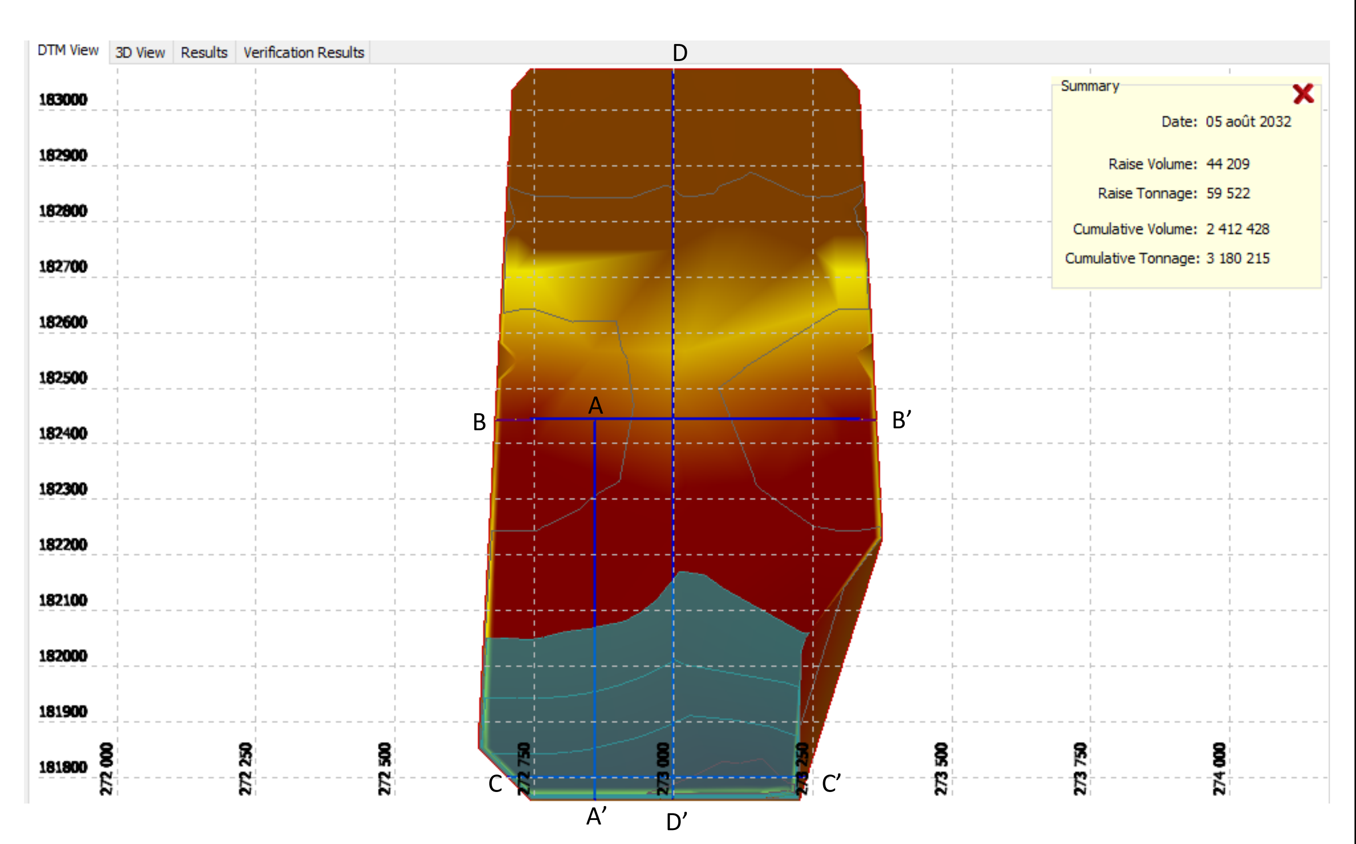


Figure 72: vue des coupes réalisées



- ✓ L'élévation du bassin en longueur à partir des deux entrées coupe A-A' :

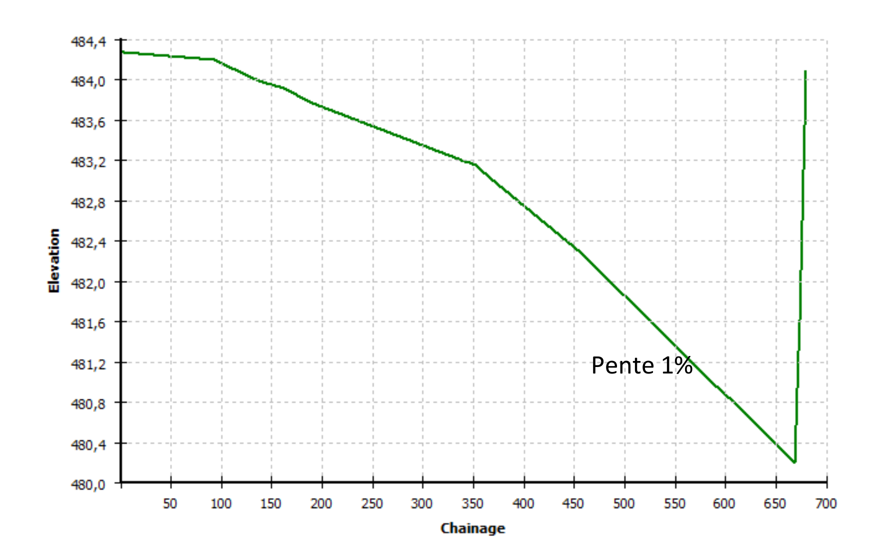


Figure 73: coupe A-A'

On constate que la boue prend une répartition uniforme en longueur et qu'on atteint une cote NGM intéressante à la sortie de 480NGM.

- ✓ L'élévation en largeur à la section des 2 entrées coupe B-B' :

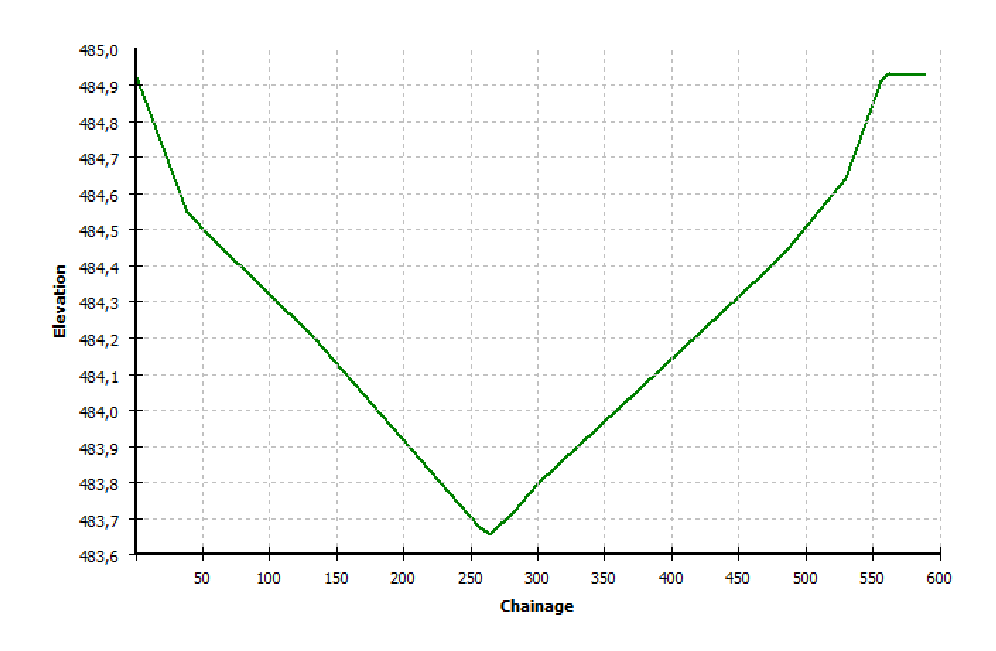


Figure 74: coupe B-B'

On constate que la répartition non uniforme de la boue en largeur existe toujours mais puisqu'il y a une pente de 1% en longueur qui favorise l'écoulement vers la sortie, on ne craint rien.



- ✓ L'élévation en largeur à la sortie coupe C-C' :

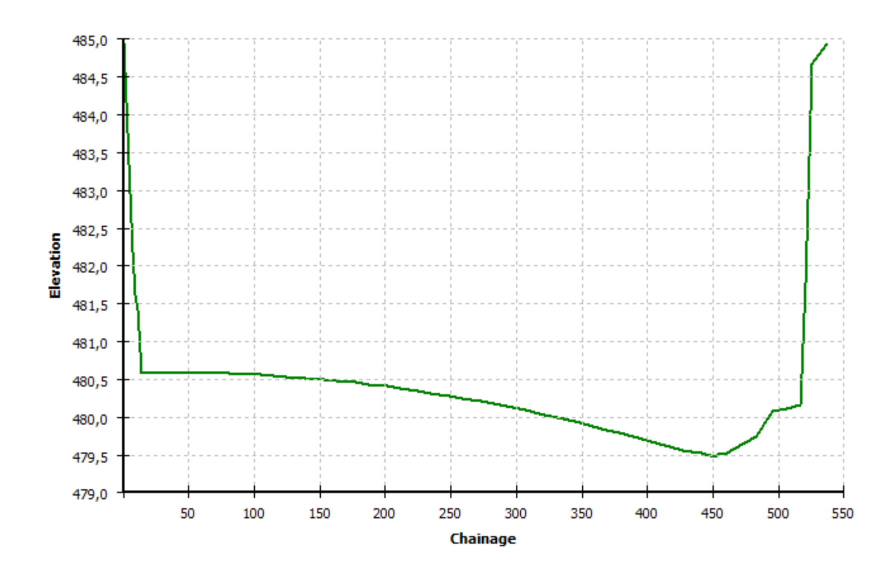


Figure 75: coupe C-C'

On constate que la répartition de la boue est uniforme à la sortie du bassin et l'élévation importante de la boue qui arrive à 33m de hauteur par rapport au terrain naturel.

Remarque : Coupe D-D'

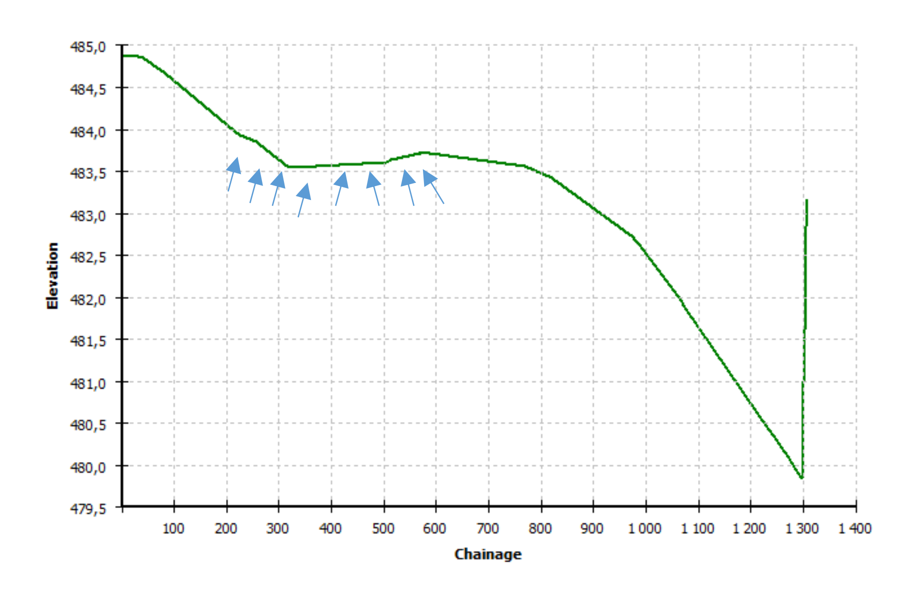


Figure 76: coupe D-D'

On constate qu'on va perdre un volume d'eau qui va être emprisonné dans l'espace indiqué sur le graphe, mais il apparait qu'il est négligeable.

11. Recommandations et planning d'utilisation du bassin :

Pour conclure, le meilleur scenario est de construire un bassin avec les instructions suivantes :



- La surface de base à une pente de 2%.
- Introduction des 4 chicanes.
- Respecter la distribution des 3 entrées au côté Nord du bassin.
- Ajouter 2 entrées à mi-distance en longueur après la saturation.
- Pour avoir les résultats présentés et l'efficacité en terme de rendement de stockage et de récupération pour cette configuration, il faut respecter le planning des quantités à débiter mentionné en annexe 1.j.

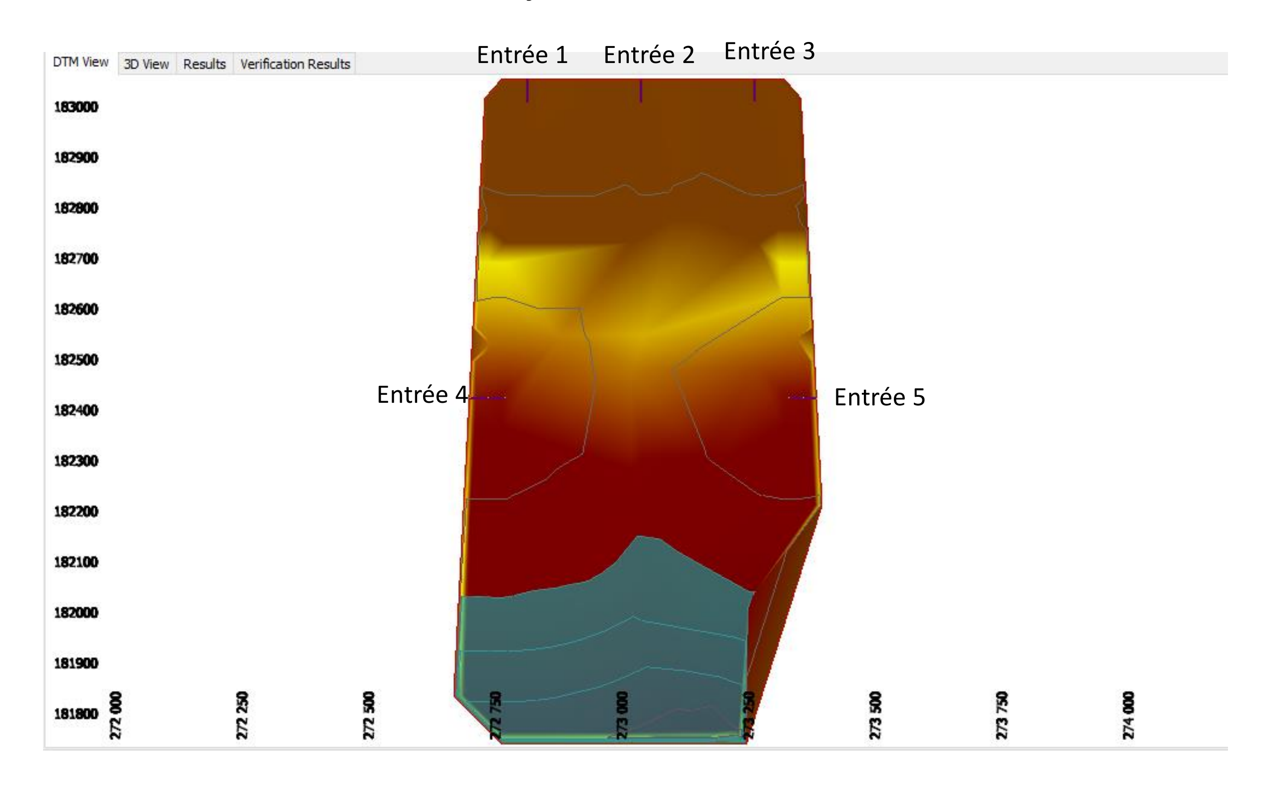


Figure 77: 5 entrées de boue proposées

On obtient le planning en se basant sur les tonnages déposés dans chaque étape, fournis par RIFT TD, après en divisant par la durée de déposition, on trouve le débit solide de chaque entrée, puis en multipliant par le rapport débit solide/débit boue, on trouve le débit à desservir à partir de chaque entrée sur toute la durée de saturation.



Chapitre V : Stabilité de la digue et dimensionnement des chicanes



I. Stabilité de la digue:

La zone d'étude constitue une ancienne zone d'exploitation des phosphates et renferme par conséquent des zones en tranchées généralement remblayées par le stérile du phosphate. A ceci, s'ajoute la présence d'une série de cavaliers. Une telle configuration a chamboulé la topographie et la géomorphologie de la future digue. Ainsi, le site d'étude correspond à une zone généralement en remblai avec une hauteur variable.

Les calculs de stabilité ont été menés en considérant :

- La géométrie de la fondation ;
- Les caractéristiques mécaniques des différents matériaux constituant la digue ;
- Les caractéristiques mécaniques de la fondation au droit de la digue.

1. Paramètres de modélisation :

Les paramètres suivants sont retenus pour l'ensemble des modélisations, ils sont obtenus à partir des différents essais géotechniques effectués par le laboratoire LPEE.

	cavalier existant	remblai	drain	fondation	boue	géo membrane
poids volumique (kN/m^3)	18,5	19	18	22	14	-
angle de frottement interne effectif °	26	29	40	37	15	-
cohésion effective kN/m^2	3	1	0	100	0	-
perméabilité à saturation Ksat (m/s)	5.10^{-6}	7.10^{-6}	1.10^{-3}	5.10^{-7}	2.10^{-6}	0

Tableau 33: paramètres géotechniques utilisées dans la simulation

2. Profil de calcul :

L'étude de stabilité de la digue a été effectuée sur deux profils types (Les cas critiques en termes des hauteurs et des quantités remblai), le 1er profil est situé sur le côté Nord et constitué notamment de cavaliers existants avec une petite quantité de remblai en amont et en aval, tandis que le 2ème est situé sur le côté Sud constitué totalement en remblai (Voir les figures 78 et 79). Ces profils sont symétriques avec une pente de 2.6H/1V.



3. Méthodologie de calcul :

Les calculs de stabilité ont été effectués à l'aide des logiciels SEEP/W et SLOPE/W, faisant partie de la suite GeoStudio (version 2012) :

- ✓ SEEP/W permet de calculer la ligne piézométrique et les pressions interstitielles pour les différents cas considérés, ces résultats sont utilisés comme données d'entrée dans le calcul de stabilité ;
- ✓ SLOPE/W permet de calculer la stabilité des pentes suivant les méthodes analytiques citées antérieurement, comme il offre la possibilité de définir la région des centres de cercles de glissement et des rayons limites, ou bien d'effectuer la recherche automatique de la surface de rupture critique.

La ligne piézométrique est calculée par **éléments finis** sur SEEP/W, un écoulement en régime permanent est considéré pour le remplissage par la boue accompagnée d'une couche supérieure d'eau, avec une perméabilité isotrope et homogène dans le corps de la digue et la fondation.

Puisque l'écoulement transitoire d'un matériau n'est pas possible à modéliser (remplissage par la boue avec une couche supérieure d'eau), le calcul a été effectué en régime permanent pour plusieurs niveaux de remplissage de la boue.
La stabilité de la digue est calculée par la méthode des tranches, basée sur la théorie de l'équilibre limite. La méthode consiste à examiner l'équilibre des forces actives agissant le long de la surface de rupture potentielle et les forces de résistance agissant le long de la même surface.
Le calcul de stabilité est ramené à un problème plan en négligeant les interactions. Ce choix est justifié par la géométrie relativement simple de la digue. Ce choix est sécuritaire par rapport à un calcul 3D puisqu'il considère que la rupture se produit le long de la digue, et néglige l'interaction entre les sections.
Dans le cadre de ce projet, la méthode de Morgenstern-Price est utilisée, et l'algorithme de recherche de surface critique est conduit en deux étapes : Recherche de surface critique circulaire par un processus itératif, puis l'optimisation de cette dernière pour obtenir une surface critique de forme quelconque.
Le critère de rupture de tous les sols est Mohr-Coulomb.



4. Situations envisagées :

1. Fin de construction :

Le corps de la digue est considéré constitué de matériau assez étanche. En conséquence, et sous l'effet de la remontée des remblais, des pressions interstitielles sont générées dans le corps de la digue.

Ces pressions interstitielles réduisent la stabilité de l'ouvrage à court terme, avant de se dissiper lentement par consolidation. La prise en compte de ce phénomène conduit à aborder le cas de charge de fin de construction.

2. Retenue vide :

Le cas d'une retenue vide est traité pareillement au cas de fin de construction, avec une modification des paramètres géotechniques du matériau de la digue, en raison de la dissipation lente des pressions interstitielles par consolidation.

3. Retenue remplie par la boue à hcritique :

Le niveau de la boue est traité en plusieurs cas afin de trouver la hauteur critique vis-à-vis la stabilité de la digue. Une couche infinitésimale d'eau est supposée existante en haut de la boue afin de modéliser la ligne piézométrique. Le calcul des conditions hydrauliques dans la digue est réalisé en régime permanent.

4. Cas sismique :

D'après RPS 2000 version 2011, la commune de Ben Guérir relevant de la province El Kelaâ Sraghna est située dans la zone 1 en accélération et en vitesse, ce qui correspond à une accélération de 0.07g, et une vitesse de 0.07 cm/s. La probabilité de dépassement de ces valeurs est égale à 10% en 50 ans, soit une période de retour de 475 ans. Par analogie avec le calcul des actions sur les bâtiments proposés par le RPS. L'accélération est multipliée par des facteurs dépendant du site, et de la classe de l'ouvrage. Les coefficients suivants sont proposés pour la digue de stockage des boues de Benguerir :

- ✓ Coefficient de site : S1 = 1,00
- ✓ Coefficient de priorité : Classe III I = 1,30

Il en résulte une accélération de calcul = 0.091g.

L'accélération maximale considérée dans le calcul de stabilité est : a_{max}= $0.1g$.

L'action sismique est prise en compte par la méthode pseudo-statique, elle consiste à schématiser l'action dynamique du séisme par un chargement statique : l'effort appliqué sur un barrage est égal à une fraction de la force de pesanteur. La force sismique pseudo-statique est calculée par la formule : $F=\alpha.m.a_{max}$



Avec α coefficient pseudo-statique égal à :

- α_h =2/3 = 0.67 pour la composante horizontale ;
- α_v =1/3* α_h = 0.22 pour la composante verticale ;

Le niveau d'eau, les sous-pressions, et les paramètres géotechniques sont analogues à ceux de la retenue vide.

Les situations sismiques sont considérées pour les deux cas suivants :

- Retenue vide ;
- Retenue remplie par la boue à la hauteur critique.

5. Résultats de la modélisation :

1. Profil dimensionnant type 1 (Nord) : H_{am}=13m ; H_{av}=3m

La digue utilisée pour le côté Nord et partie centrale du bassin est constituée des cavaliers existants sur terrain, avec ajout de petites quantités de remblai de l'extérieur du bassin, et vu la qualité des matériaux de ces cavaliers, on n'a pas besoin d'ajouter un drain ou une géomembrane, le profil dimensionnant est le suivant :

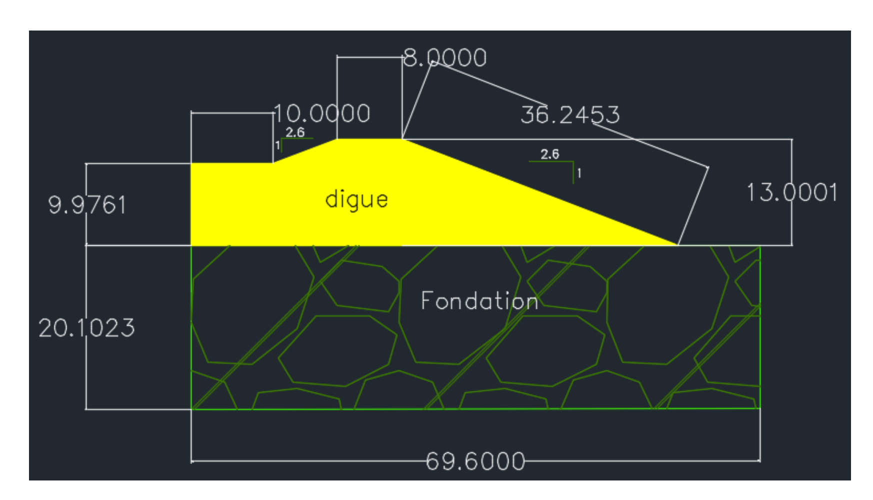


Figure 78: profil dimensionnant Nord et partie centrale du bassin

Le tableau suivant résume les facteurs de sécurité critiques obtenus :

	Cas	objectif	amont	% objectif	aval	% objectif
profil nord	fin de construction	1,3	3,2	246,15	1,35	103,84
	retenue vide	1,5	1,6	106,66	2,14	142,66
	boue remplie à h_{crit}	1,5	1,54	102,66	2,15	143,33
	cas sismique					
	retenue vide	1,1	1,102	100,18	1,287	117



	boue à hcrit	1,1	1,19	108,18	1,276	116

Tableau 34: résultats de stabilité du profil type 1

On constate que tous les cas étudiés sont vérifiés en terme de stabilité, les résultats détaillés sont joints dans l'annexe 2.1. On peut également augmenter le coefficient de sécurité par l'ajout d'une butée à l'aval de la digue afin de la stabiliser de plus, ou bien ajouter une géomembrane qui joue le rôle d'un obstacle devant l'eau ainsi elle diminue les pressions interstitielles qui se développe à l'intérieur de la digue, on peut également ajouter un drain afin d'annuler rapidement les pressions interstitielles développés.

2. Profil dimensionnant type 2 (Sud) Ham=13m ; Hav=13,85m

La digue utilisée pour le côté Sud du bassin est constitué de remblais transportés à partir des cavaliers de bonne qualité les plus proches (voir annexe). En fait, ce profil est dimensionné en ajoutant une (géomembrane +géotextile) à l'amont de la digue et un drain à son aval. Cet ajout est pour garantir une stabilité du profil Sud.

Le profil inclut la stabilité de la tranchée qui collecte l'eau à l'aval de la digue et le dirige vers le bassin de récupération des eaux. Le profil dimensionnant est le suivant :

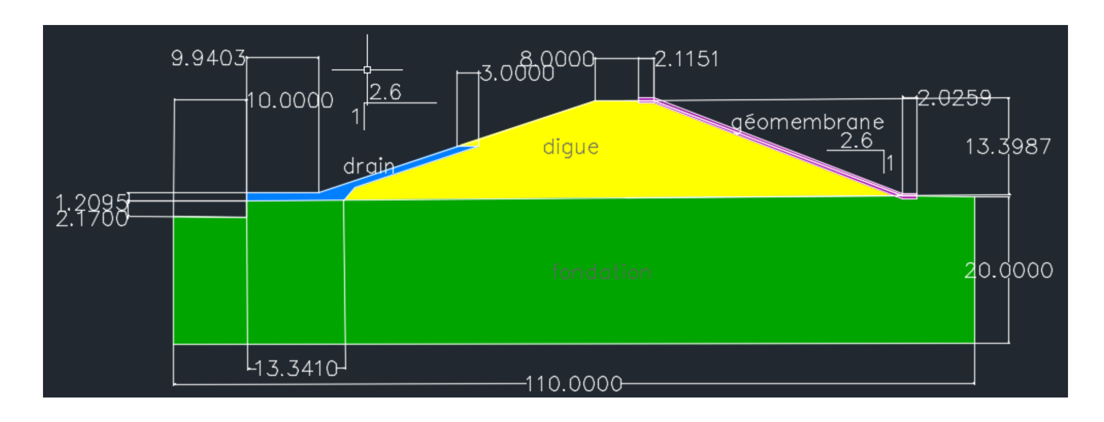


Figure 79: profil dimensionnant Sud

Le tableau suivant résume les facteurs de sécurité critiques obtenus :

	cas	objectif	amont	% objectif	aval	% objectif
profil sud	fin de construction	1,3	1,652	127,07	1,703	131
	retenue vide	1,5	2,108	140,53	2,089	139,26
	boue remplie à hcrit	1,5	1,51	100,66	1,516	101,06
	cas sismique					
	retenue vide	1,1	1,345	122,27	3,087	280,63



	boue à hcrit	1,1	1,202	109,27	1,126	102,36

Tableau 35: résultats de stabilité du profil type2

On constate que tous les cas étudiés sont vérifiés en terme de stabilité, les résultats détaillés sont joints dans l'annexe 2.2.

II. Dimensionnement des chicanes:

Les chicanes introduites pour le cas optimal du bassin (pente 2% avec chicanes) sont considérées comme des murs de soutènement qui résistent à la poussée de la boue cumulée.

1. Predimensionnement:

D'après SETRA (service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements):

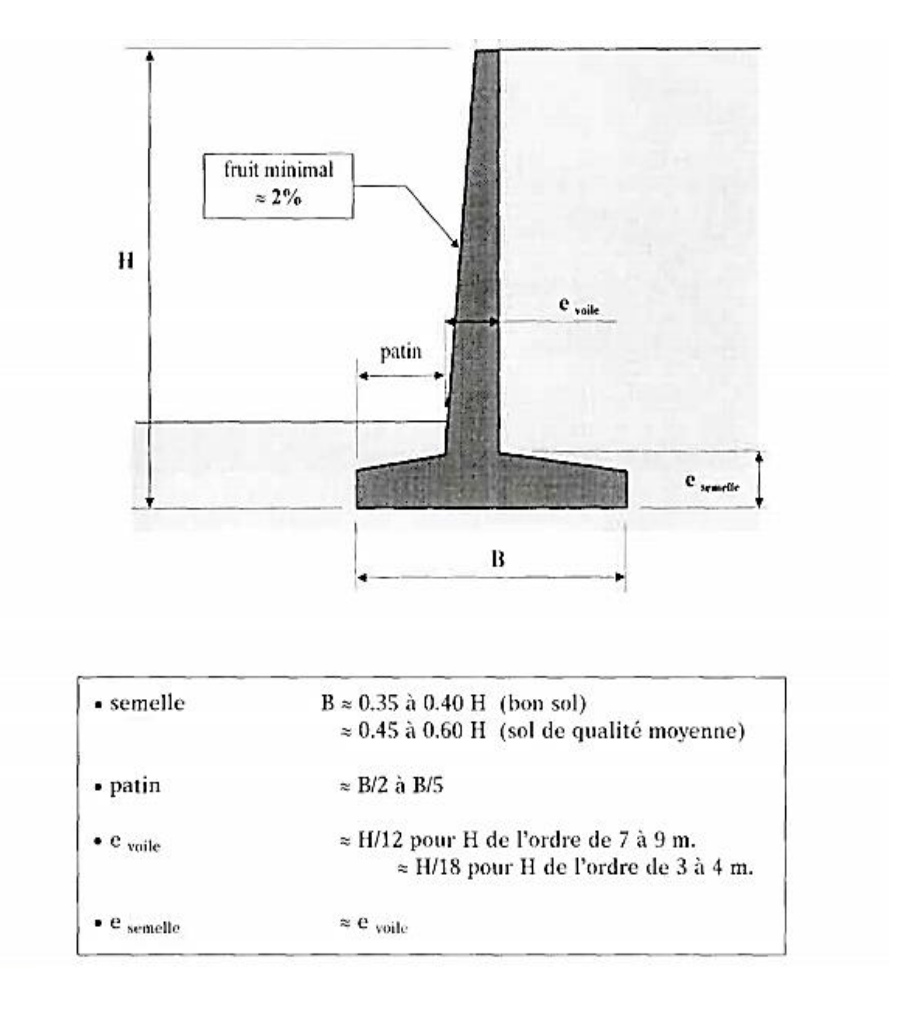


Figure 80: predimensionnement des murs de soutènement selon SETRA

Hauteur de prédimensionnment de chicane: H= 7m

- **Epaisseur du voile en amont :**

  e_v =0,3 m



$0,15 <= e_v$

- **Base de la semelle :**

  B=3,5 m

  0,4H<=B<=0,6H

- **Patin**

  P= 0,9 m

  B /5<=P<=B /2

- **Epaisseur du voile :**

  $e_{voile} = 0,6$ m

- **Epaisseur de la semelle :**

  $e_{semelle} = 0,6 \text{ m} = e_{voile}$

- **Fruit :**

  Fruit=5,5 % >= 2%

Donc on résume notre prédimensionnement :

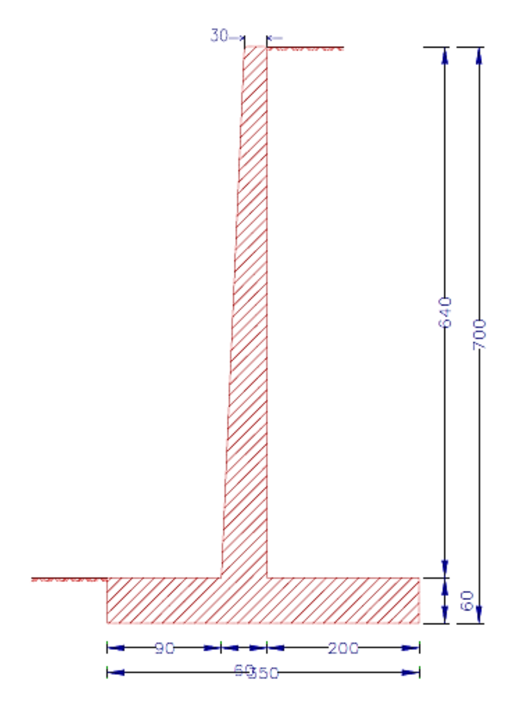


Figure 81: Géométrie de prédimensionnement

2. Inventaire des charges:

- Poussée et butée des sols :

Pour la force de poussée :



Coefficient de poussée: $K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2}\right)$

La force de poussée résultante est : $F_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$

Pour la butée:

Coefficient de butée: $K_p = tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$

La force de butée résultante : $F_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$

Soit les notations suivantes:

N1 : Poids des terres en amont

N2 : Poids des terres en aval

N3 : Poids du mur

N4 : Poids de la semelle

Fa : Résultante de la force de poussée

Fp : Résultante de la force de butée

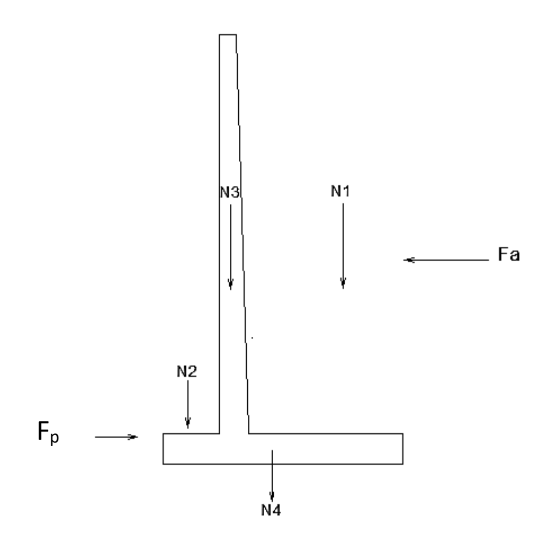


Figure 82: notations des forces appliquées

3. Modélisation sur CYPE:

En utilisant les données géotechniques des sols déjà citées dans la partie de stabilité de la digue dans le tableau 34, on modélise sur CYPE notre mur de soutènement avec les forces des terres en suivant la méthode de Rankine.



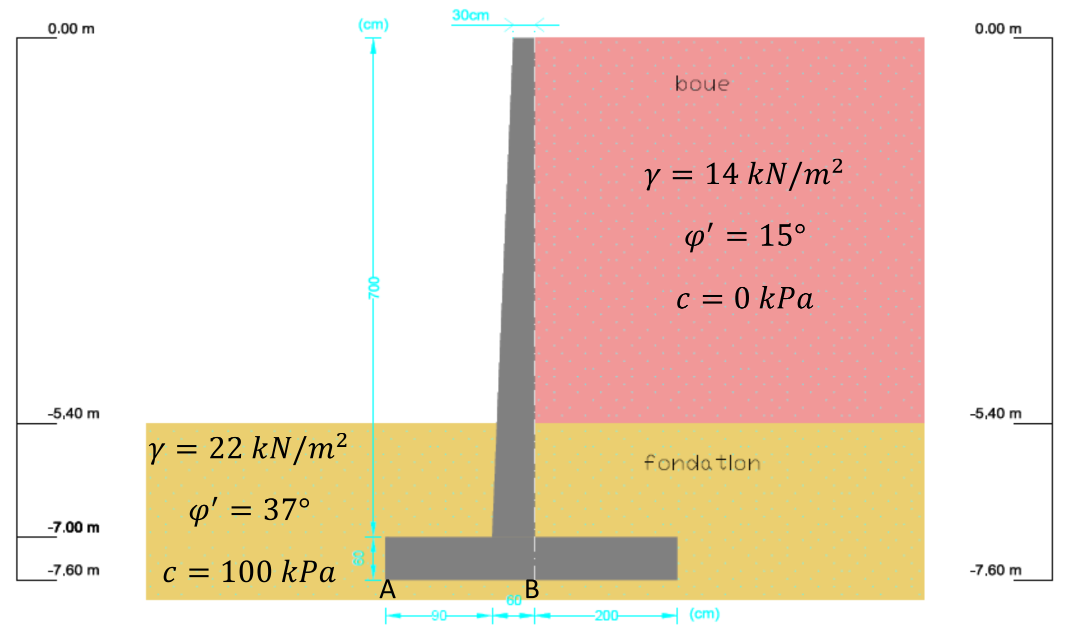


Figure 83: Modélisation des forces des terres

4. Résultats de dimensionnement en CYPE:

Après introduction de la géométrie et les caractéristiques du sol, j'ai trouvé que toutes les conditions de stabilité sont vérifiées sauf la condition de non renversement, alors pour remédier à ce problème de conception, j'ai élargis le patin de 90cm à 150 cm afin d'avoir un moment résistant au renversement par rapport au point B (mi-distance de la semelle).

Le profil vérifiant les conditions de stabilité est le suivant :



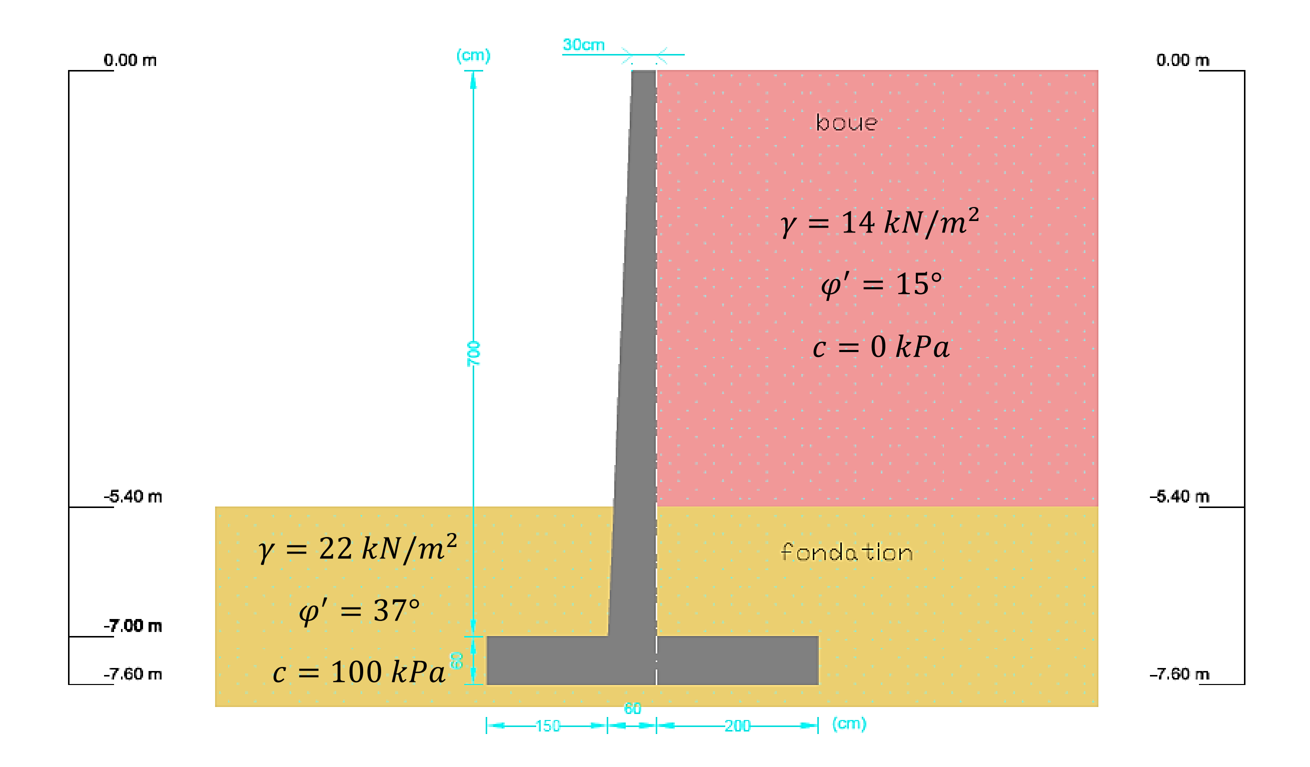


Figure 84: Géométrie finale du mur de soutènement

1. Stabilité au glissement :

Pour vérifier la condition de stabilité vis-à-vis le glissement, il faut que :

$$\frac{F_v * tan\varphi'}{F_H} \geq 1{,}5$$

Avec $\varphi' = \frac{2}{3}\varphi$ (angle de frottement du sol).

F_V: la somme des forces verticales stabilisantes.

F_H: la somme des forces horizontales déstabilisantes.

Le cercle de glissement critique trouvé est le suivant :



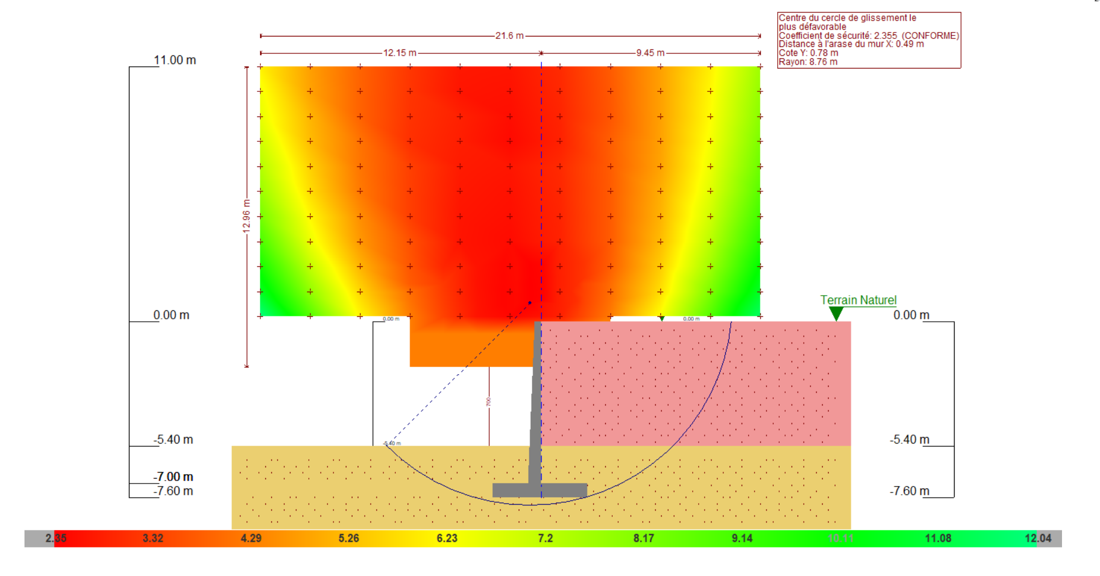


Figure 85: Cercle de glissement critique

Avec un coefficient de sécurité =2,35 conforme :

Centre du cercle de glissement le
plus défavorable
Coefficient de sécurité: 2.355 (CONFORME)
Distance à l'arase du mur X: 0.49 m
Cote Y: 0.78 m
Rayon: 8.76 m

2. Stabilité au renversement:

Pour avoir la stabilité vis-à-vis le renversement, il faut que:

$$\frac{M_{v/A}}{M_{H/A}} \geq 1{,}5$$

Avec $M_{v/A}$: *somme des moments des forces verticales par rapport à A*

$M_{H/A}$: *somme des moments des forces horizontales par rapport à A*

La note de calcul de CYPE nous donne:

Vérification	Valeurs	État
Vérification de la stabilité:		
-Coefficient de sécurité au renversement:	Minimum: 1.8 Calculé: 2.02	Conforme
-Coefficient de sécurité au glissement:	Minimum: 1.5 Calculé: 2.35	Conforme



3. Stabilité au poinçonnement:

La condition à respecter est :

$$q_{ref} \leq q_{adm}$$

Avec q_{ref}: contrainte conventionelle de référence (dépend de l′excentricité et du chargement de la géometrie) en kPa

q_{adm}: contrainte admissible du sol en kPa

CYPE nous donne la vérification de stabilité vis-à-vis le poinçonnement :

Contraintes appliquées au sol:		
-Contrainte moyenne:	Maximum: 0.2 MPa Calculé: 0.1278 MPa	Conforme
-Contrainte maximale:	Maximum: 0.25 MPa Calculé: 0.2468 MPa	Conforme

Avec q_{adm}= 0,25 MPa et q_{ref}= 0,246 MPa

4. Détermination des armatures:

Selon le BAEL 99

- Calcul de voile:

Le voile est calculé comme une console encastrée sur la semelle et soumise à une charge trapézoïdale, les armatures et leurs arrêts se déterminent à partir des diagrammes du moment de flexion composée et de l’effort tranchant.

Le dimensionnement se fait à l’état limite ultime en suivant l'organigramme mentionné en annexe 2.3



CYPE nous donne le ferraillage suivant:

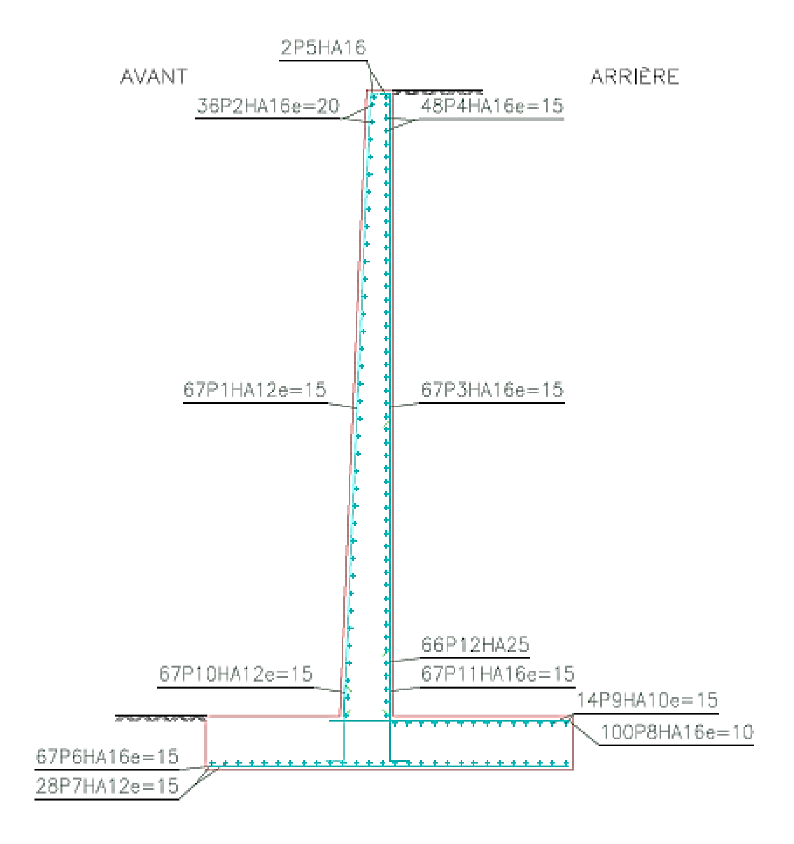


Figure 86: Ferraillage du mur de soutènement

5. Etanchéité de la chicane:

Vu que le béton est très fragile en contact avec l'eau, et pour ne pas avoir un développement des pressions interstitielles à l'intérieur du mur qui peuvent s'infiltrer à l'intérieur du corps de la digue et toucher ainsi à sa stabilité, on prévoit couvrir les chicanes avec une (géomembrane+géotextile) afin d'imperméabiliser les chicanes contre l'infiltration des eaux.



Conclusion

En guise de conclusion, l'étude du comportement de la boue à l'intérieur du bassin pour plusieurs scénarios proposés a montré que le cas optimal, en terme de stockage de solide et récupération d'eau claire, est de construire un bassin de pente 2% avec introduction des chicanes de hauteur 5 à 7m.

Le dimensionnement des chicanes s'est fait en utilisant CYPE, et concernant la stabilité du corps de la digue pour le cas optimal, on doit disposer des quantités de remblais nécessaires pour la construction de la digue ainsi que ses profils dimensionnants. La vérification de la stabilité faite dans ce rapport concerne le premier scénario (bassin sans pente et sans chicanes) choisi par le bureau d'étude.



Bibliographie

[1] Cours académiques

Cours de transport des sédiments cohésifs du Professeur A. SADOK.

Cours de géotechnique de prof. Mme EL BRAHMI.

[2] règlements utilisés

Direction de la qualité et des affaires techniques: Le règlement de construction parasismique (RPS 2000- version 2011).

M. R. LACROIX, Professeur honoraire à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: Règles BAEL 91 révisées 99, février 2000.

[3] Rapports d'études

Randy Bushey, Tavis Rogers: Jacobs report 19-20 sept 2018 Benguerir TSF Workshop Summary 9 octobre 2018.

Laboratoire RADISE, Chris Beyers: Summary of laboratory test results RADISE, Testing of Tailings, Mars 2019.

Responsables des reconnaissances géologiques L. AIT AISSA: Rapport de LPEE des essais géotechniques de reconnaissance, Juillet 2017.

[4] sites Web

http://www.makyol.com.tr/fr/projects; l'historique des digues d'épandage de l'OCP.

www.tailings.info; les méthodes de déposition des boues.



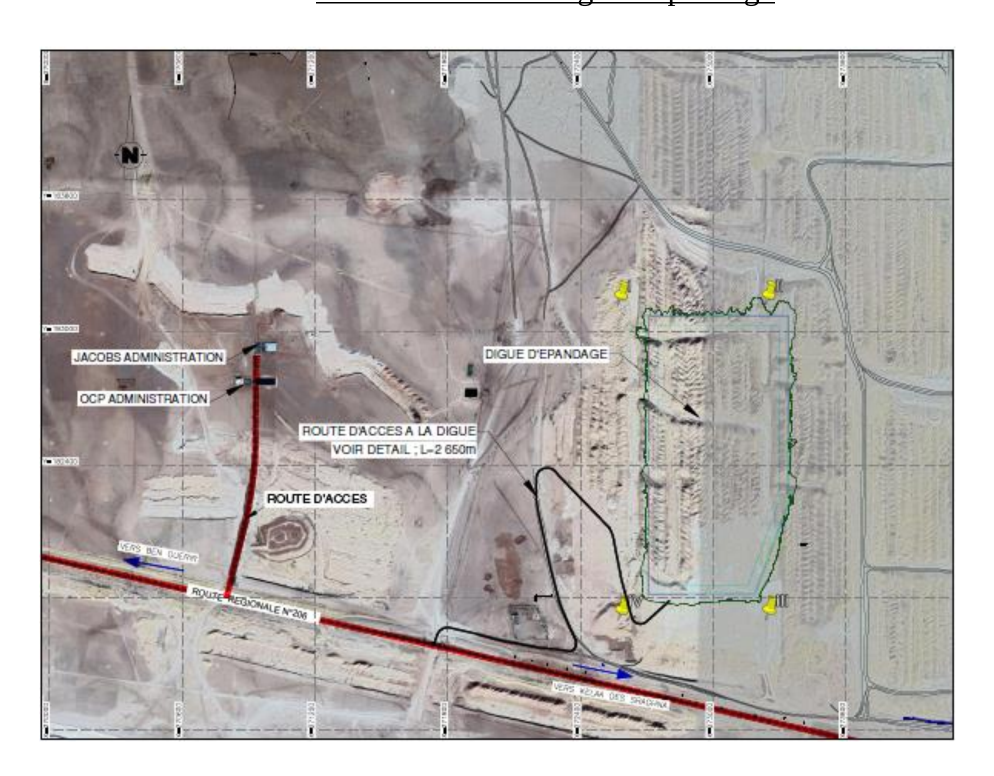
Annexe :

I. Annexe 1:

a. Repérage de la digue en google maps:



b. Route d'accès à la digue d'épandage





c. Vue en plan de la digue d'épandage (géomembrane en gris)

VUE EN PLAN

Coté Sud

Coté Nord

Longueur= 1182,4m

Largeur= 556,4m

BASSIN DE REPRISE

CLARINETTE CONDUITE METALLIQUE Ø500 mm

CLARINETTE CONDUITE METALLIQUE Ø500 mm

TAPIS DRAINANT

CLARINETTE CONDUITE METALLIQUE Ø500 mm

TAPIS DRAINANT

TAPIS DRAINANT PERIMETRAL

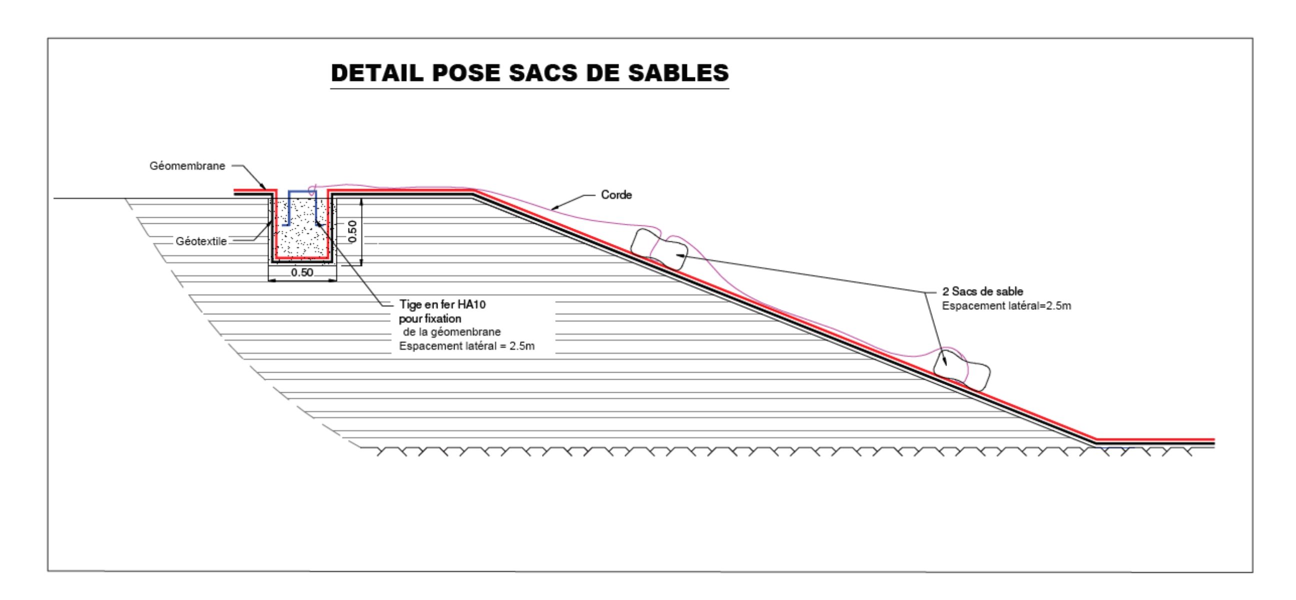
CLARINETTE CONDUITE METALLIQUE Ø500 mm

TAPIS DRAINANT

LIMITE FOUILLES

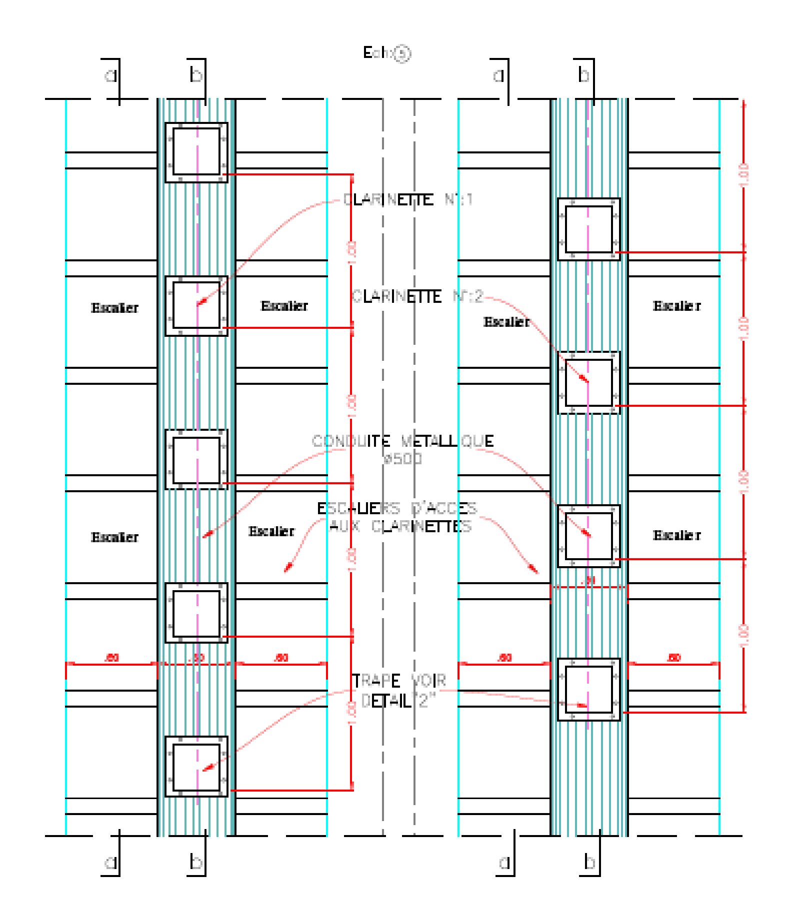
GEOMEMBRANE ET GEOTEXTILE

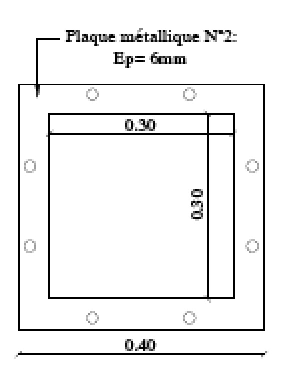
d. Détail de pose de la géomembrane

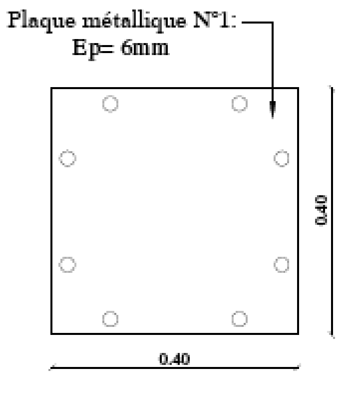




e. Coupe longitudinale des cheminées drainantes

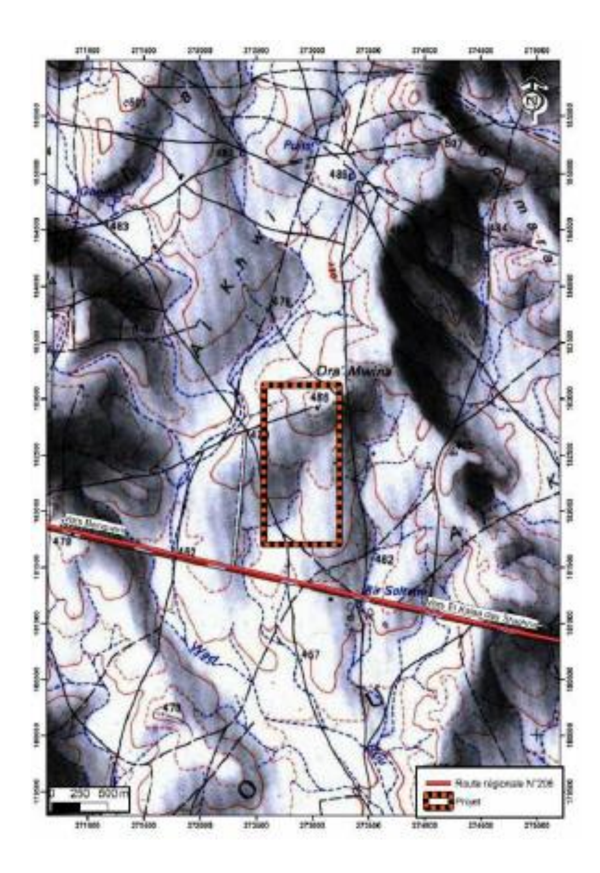




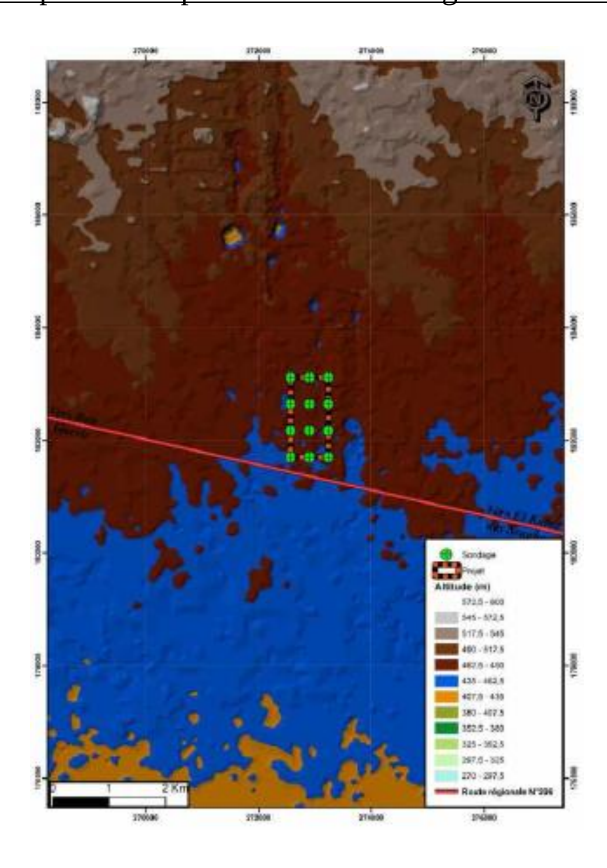




f. Le nivellement de la zone d'implantation de la digue

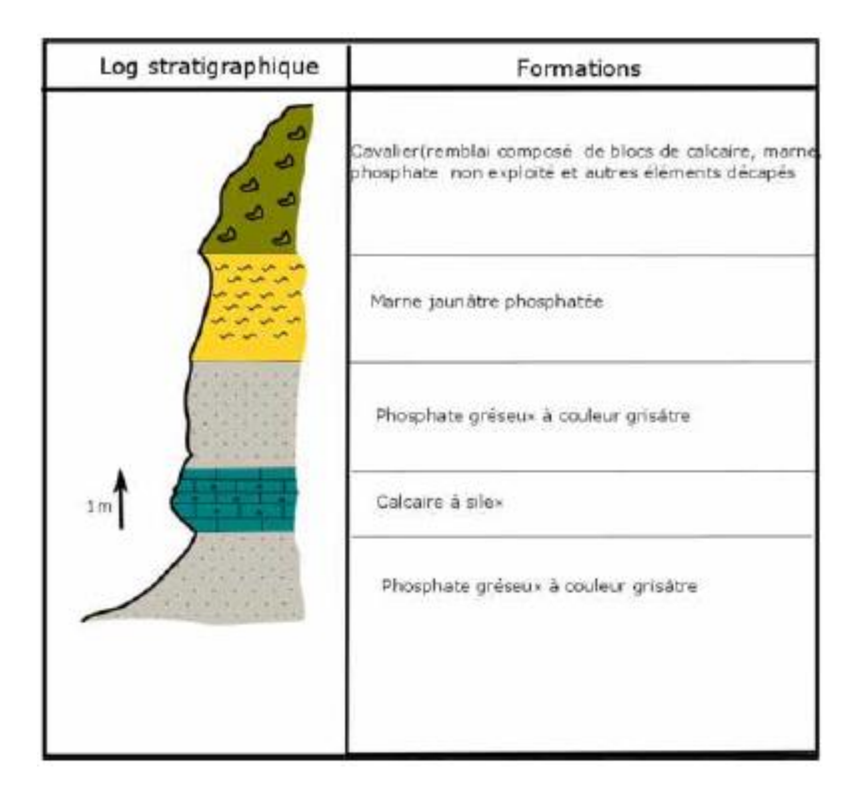


g. Les points d'implantation des sondages de reconnaissance





h. Coupe lithologique



i. Résultats d'essais de perméabilité Lugeon et Lefranc

	Tranche d'essai (m)	Type d'essai	Coefficient de perméabilité
SC01	3 – 6 m	Lefranc	1.2 E-06
SC01	10.60 -12 m	Lugeon	UL = 7.1
SC01	12.44 -15 m	Lugeon	UL = 2.4
SC01	15 -18 m	Lugeon	UL = 0.5
SC01	18 -21	Lugeon	UL = 0.45
SC02	3 – 6 m	Lefranc	2,3 E-06
SC02	6 – 9 m	Lefranc	2,0 E-06
SC02	9 – 12 m	Lefranc	4,5 E-07
SC02	13,5 -15 m	Lugeon	UL = 4.7
SC02	15 -18 m	Lugeon	UL = 5.5
SC02	18 - 21 m	Lugeon	UL = 4.5
SC03	3 – 6 m	Lefranc	7,2 E-07
SC03	6 – 9 m	Lefranc	5.3 E-07
SC03	9 - 12	Lugeon	UL = 7.7
SC03	12 – 15 m	Lefranc	5.3 E-07
SC03	15 – 18 m	Lefranc	6,0 E-07
SC03	18 – 21 m	Lefranc	1,6 E-07
SC04	23 – 26 m	Lefranc	2,4 E-07
SC04	26 – 29 m	Lefranc	1,8 E-07
SC04	29.5 – 33.6	Lugeon	UL = 3.41
SC04	34.1 – 38	Lugeon	UL = 9.74



j. Planning des débits des 5 entrées sur la durée de vie du bassin

Date initial : 18/04/2019		débit boue tonnes/heure				
date	durée de déposition en jour	débit entrée 1	débit entrée 2	débit entrée 3	débit entrée 4	débit entrée 5
25-févr-21	679	668,80	60,13	6,66	-	-
16/03/2021	19	138,43	485,05	104,45	-	-
06/04/2021	21	293,35	327,85	95,93	-	-
05/05/2021	29	157,71	521,77	70,02	-	-
01/07/2021	57	47,52	651,38	35,92	-	-
21/09/2023	812	3,37	728,91	2,54	-	-
31/10/2023	40	68,81	614,26	52,16	-	-
21/02/2024	113	24,51	691,68	18,58	-	-
09/04/2024	48	57,81	627,82	43,89	-	-
27/05/2024	48	58,01	640,95	44,35	-	-
15/07/2024	49	57,53	633,55	43,96	-	-
21/08/2024	37	76,70	593,13	58,61	-	-
13/09/2024	23	123,85	518,54	94,72	-	-
15/01/2025	124	23,01	691,62	17,61	-	-
05/03/2025	49	58,24	630,29	44,55	-	-
13/05/2025	69	41,36	663,14	31,64	-	-
02/07/2025	50	57,97	633,40	44,06	-	-
22/08/2025	51	57,77	638,54	43,80	-	-
13/10/2025	52	57,21	627,68	43,32	-	-



03/12/2025	51	58,62	640,37	44,47	-	-
24/01/2026	52	57,72	628,44	44,25	-	-
17/03/2026	52	57,72	629,47	44,43	-	-
07/05/2026	51	58,85	641,93	45,30	-	-
28/06/2026	52	57,87	630,41	44,57	-	-
19/08/2026	52	58,51	631,45	45,13	-	-
17/11/2026	90	34,25	668,10	26,60	-	-
19/02/2027	94	289,38	272,72	175,08	-	-
06/04/2027	46	303,60	171,01	266,60	-	-
29/05/2027	53	345,62	148,42	236,30	-	-
21/07/2027	53	348,47	148,42	236,75	-	-
12/09/2027	53	348,91	148,42	237,01	-	-
04/11/2027	53	350,58	148,94	238,23	-	-
28/12/2027	54	344,92	146,74	235,11	-	-
19/02/2028	53	352,92	149,67	240,11	-	-
13/04/2028	54	347,27	146,90	236,13	-	-
05/06/2028	53	354,33	149,67	240,72	-	-
29/07/2028	54	349,19	146,90	237,18	-	-
21/09/2028	54	349,52	146,90	237,50	-	-
14/11/2028	54	350,98	147,10	238,06	-	-
08/01/2029	55	345,91	144,95	234,97	-	-
03/03/2029	54	353,16	147,96	240,08	-	-
27/04/2029	55	348,73	145,27	236,83	-	-



21/06/2029	55	349,01	145,27	266,23	-	-
15/08/2029	55	351,57	145,27	238,08	-	-
09/10/2029	55	355,37	145,60	239,86	-	-
04/12/2029	56	349,96	143,54	236,21	-	-
29/01/2030	56	352,01	143,71	237,00	-	-
25/03/2030	55	358,81	146,32	241,93	-	-
20/05/2030	56	353,18	143,71	238,35	-	-
16/07/2030	57	348,58	141,18	237,49	-	-
10/09/2030	56	355,38	143,71	241,93	-	-
20/01/2031	132	-	-	-	189,98	544,84
29/01/2031	9	-	-	-	245,39	489,43
07/02/2031	9	-	-	-	250,06	484,76
16/02/2031	9	-	-	-	253,19	481,63
26/02/2031	10	-	-	-	227,97	506,85
07/03/2031	9	-	-	-	253,38	481,44
16/03/2031	9	-	-	-	253,38	481,44
25/03/2031	9	-	-	-	253,38	481,44
04/04/2031	10	-	-	-	228,05	506,77
13/04/2031	9	-	-	-	253,38	481,44
22/04/2031	9	-	-	-	253,38	481,44
01/05/2031	9	-	-	-	253,37	481,45
11/05/2031	10	-	-	-	228,03	506,79
20/05/2031	9	-	-	-	281,63	453,19



30/05/2031	10	-	-	-	274,97	459,85
09/06/2031	10	-	-	-	277,46	457,36
19/06/2031	10	-	-	-	277,44	457,38
29/06/2031	10	-	-	-	278,04	456,78
09/07/2031	10	-	-	-	278,04	456,78
19/07/2031	10	-	-	-	278,13	456,69
29/07/2031	10	-	-	-	278,60	456,22
08/08/2031	10	-	-	-	278,97	455,85
18/08/2031	10	-	-	-	279,53	455,29
28/08/2031	10	-	-	-	280,86	453,96
12/09/2031	15	-	-	-	187,33	547,49
23/09/2031	11	-	-	-	256,02	478,80
05/10/2031	12	-	-	-	237,75	497,07
17/10/2031	12	-	-	-	240,57	494,25
29/10/2031	12	-	-	-	240,40	494,42
10/11/2031	12	-	-	-	240,48	494,34
22/11/2031	12	-	-	-	240,48	494,34
03/12/2031	11	-	-	-	262,34	472,48
16/12/2031	13	-	-	-	221,98	512,84
28/12/2031	12	-	-	-	240,47	494,35
09/01/2032	12	-	-	-	240,78	494,04
21/01/2032	12	-	-	-	240,90	493,92
03/02/2032	13	-	-	-	222,37	512,45



16/02/2032	13	-	-	-	223,11	511,71
29/02/2032	13	-	-	-	229,30	505,52
13/03/2032	13	-	-	-	245,43	489,39
26/03/2032	13	-	-	-	245,43	489,39
09/04/2032	14	-	-	-	228,34	506,48
22/04/2032	13	-	-	-	246,05	488,77
06/05/2032	14	-	-	-	228,47	506,35
19/05/2032	13	-	-	-	246,47	488,35
01/06/2032	13	-	-	-	247,20	487,62
14/06/2032	13	-	-	-	200,41	534,41
27/06/2032	13	-	-	-	204,63	530,19
10/07/2032	13	-	-	-	204,68	530,14
23/07/2032	13	-	-	-	204,46	530,36
05/08/2032	13	-	-	-	204,60	530,22

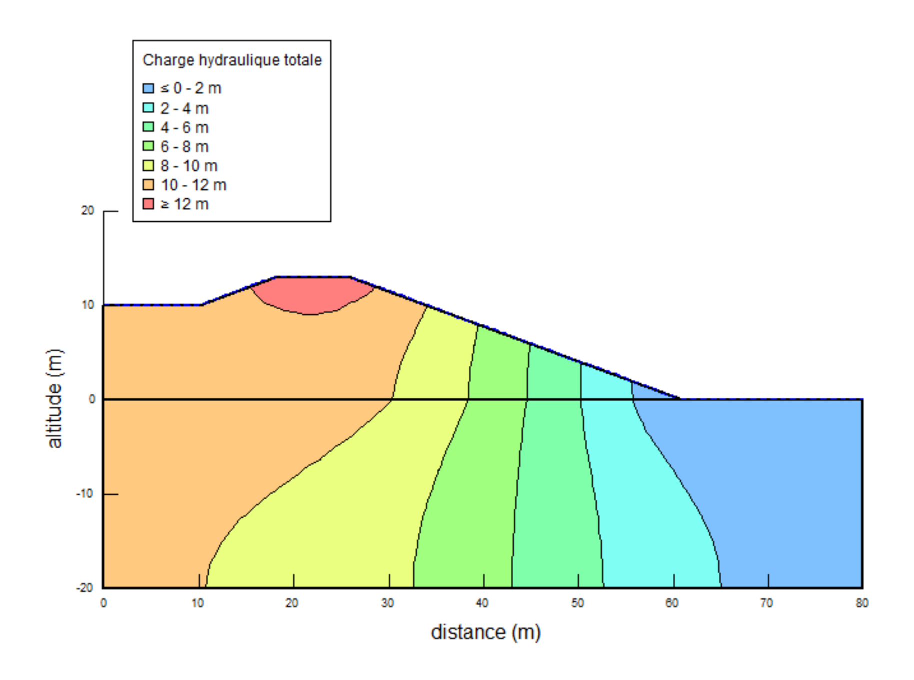


II. ANNEXE 2 :

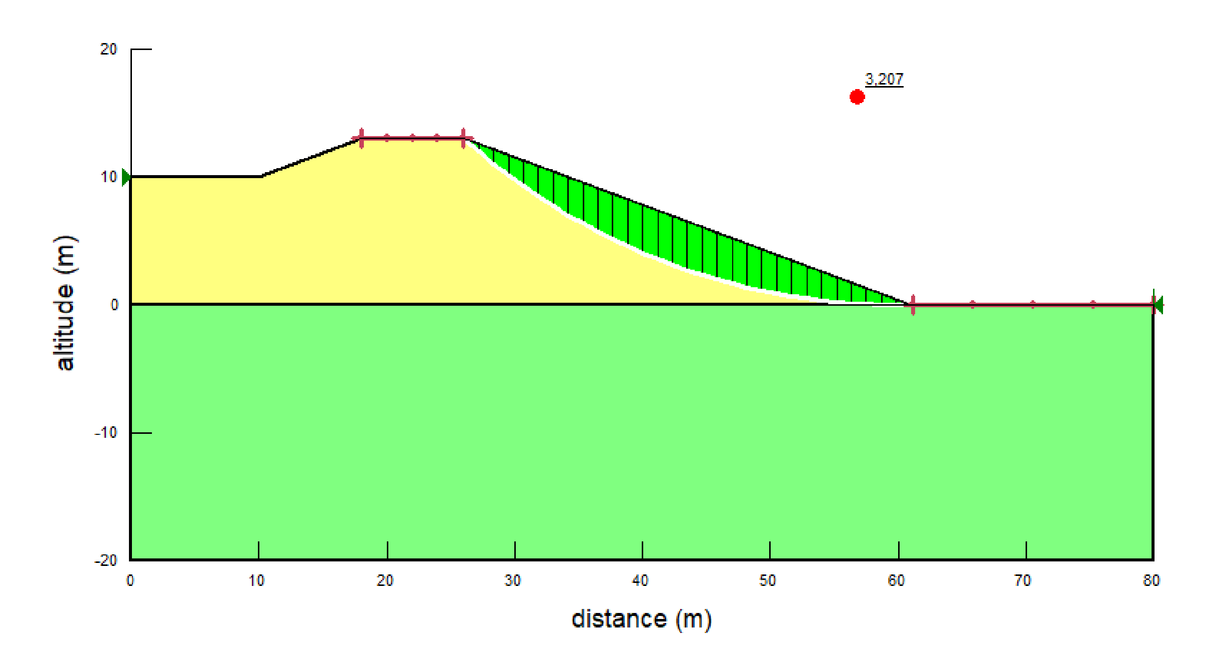
1. Résultats de stabilité du profil dimensionnant Nord:

a. Cas Fin de construction :

La ligne piézométrique

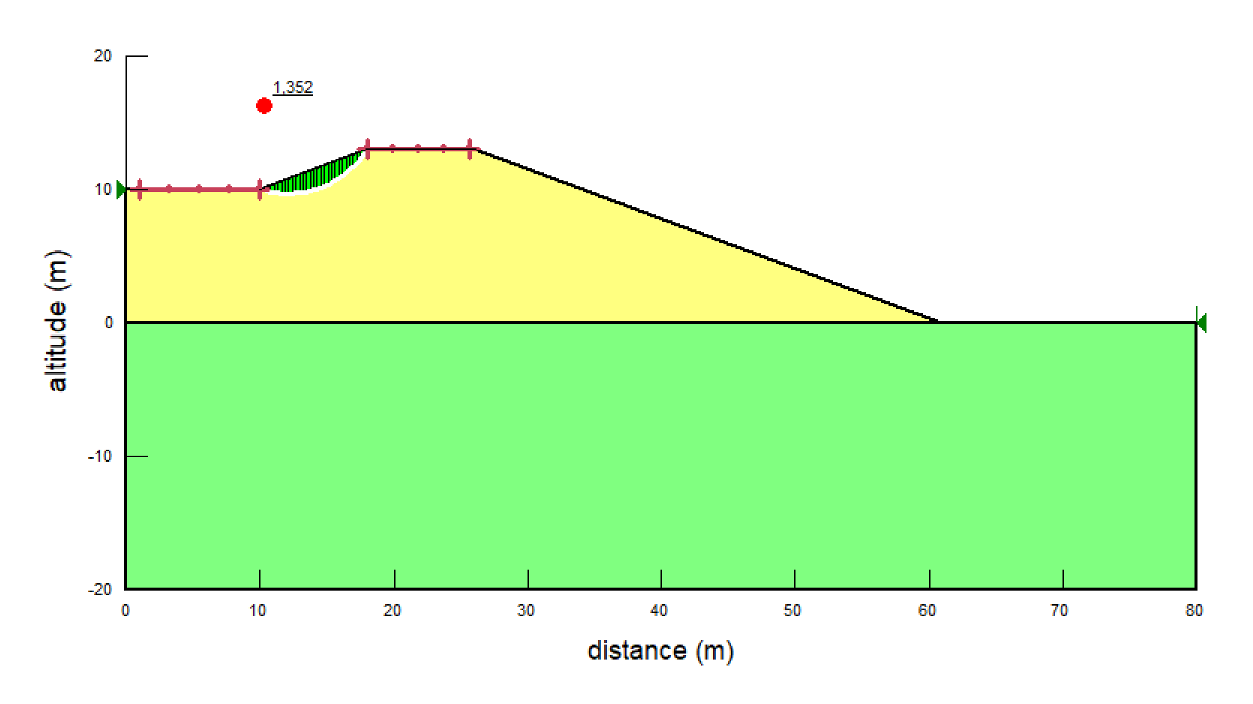


Facteur de sécurité talus amont



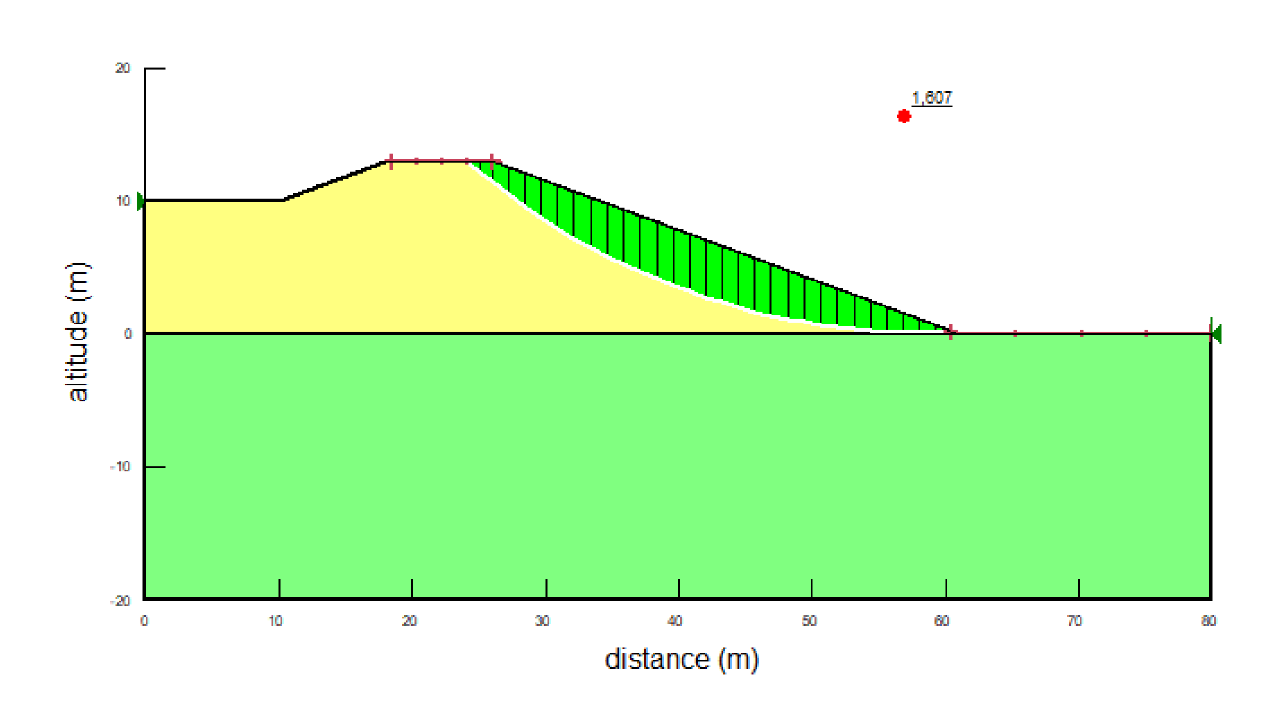


Facteur de sécurité talus aval



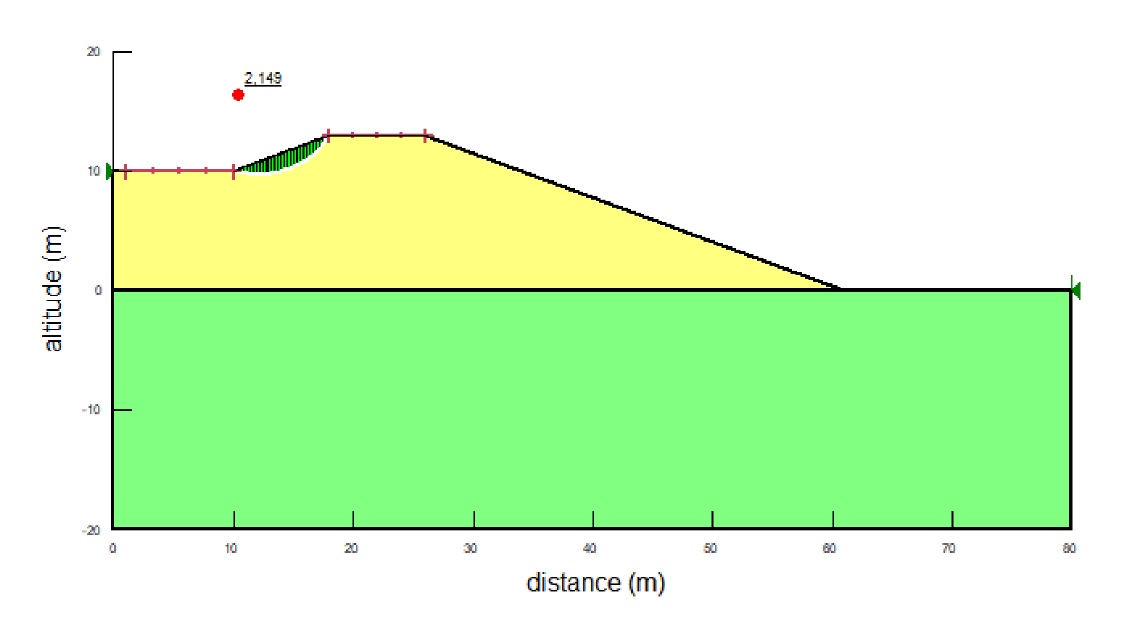
b. Cas Retenue vide :

Facteur de sécurité talus amont



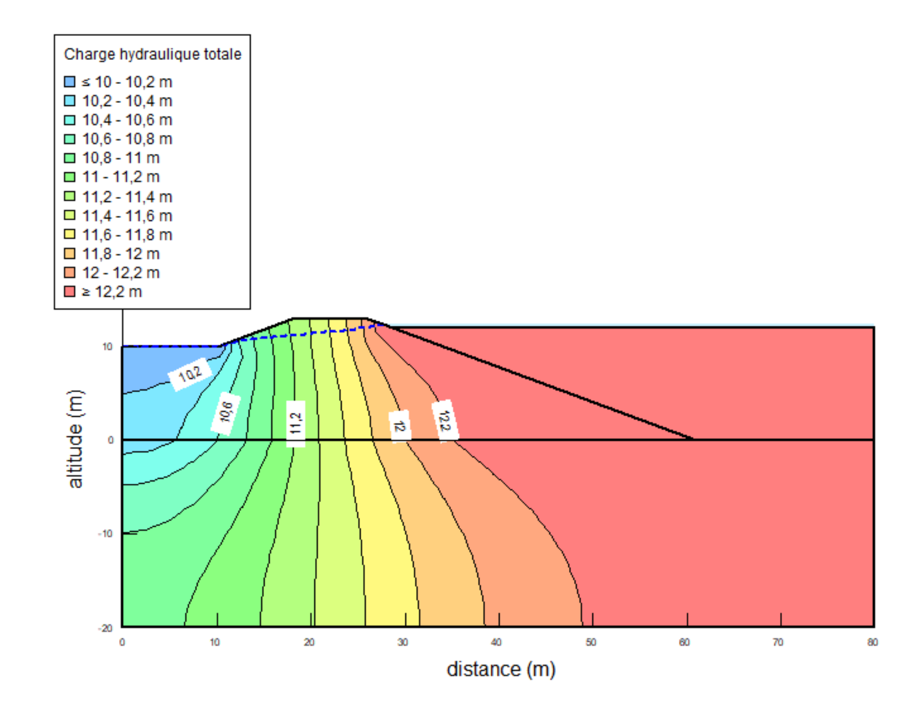


Facteur de sécurité talus aval



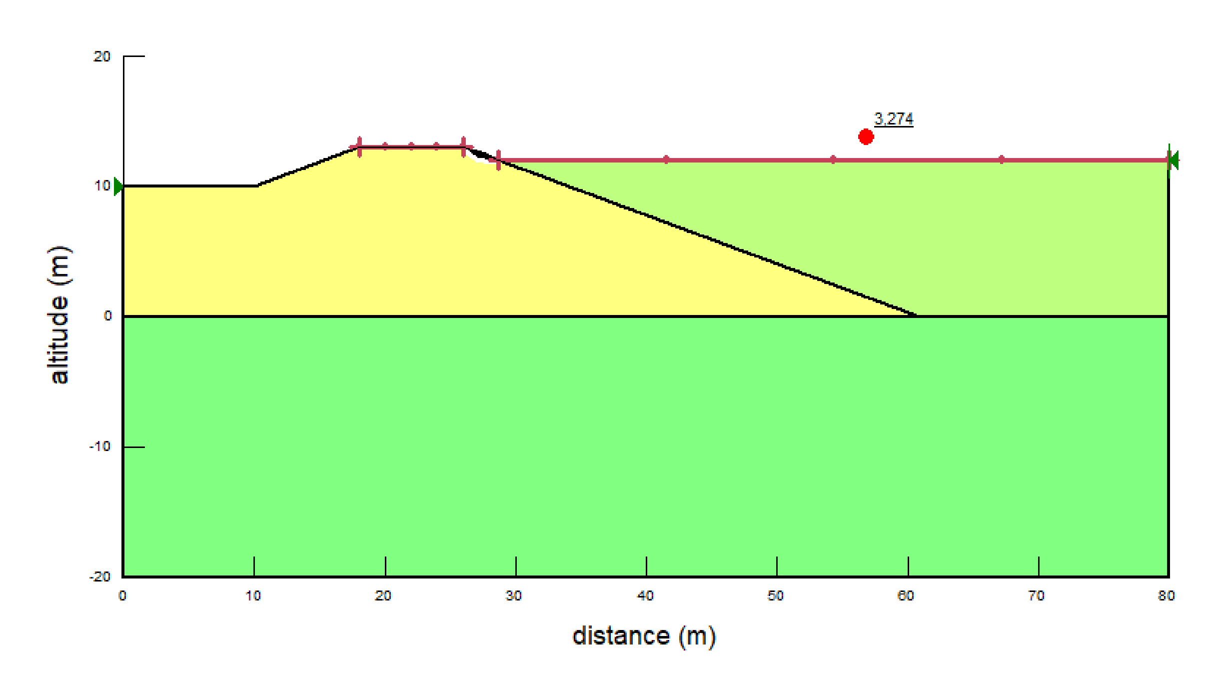
c. Cas Retenue remplie de boue à $h_{critique}$ =12m:

La ligne piézométrique

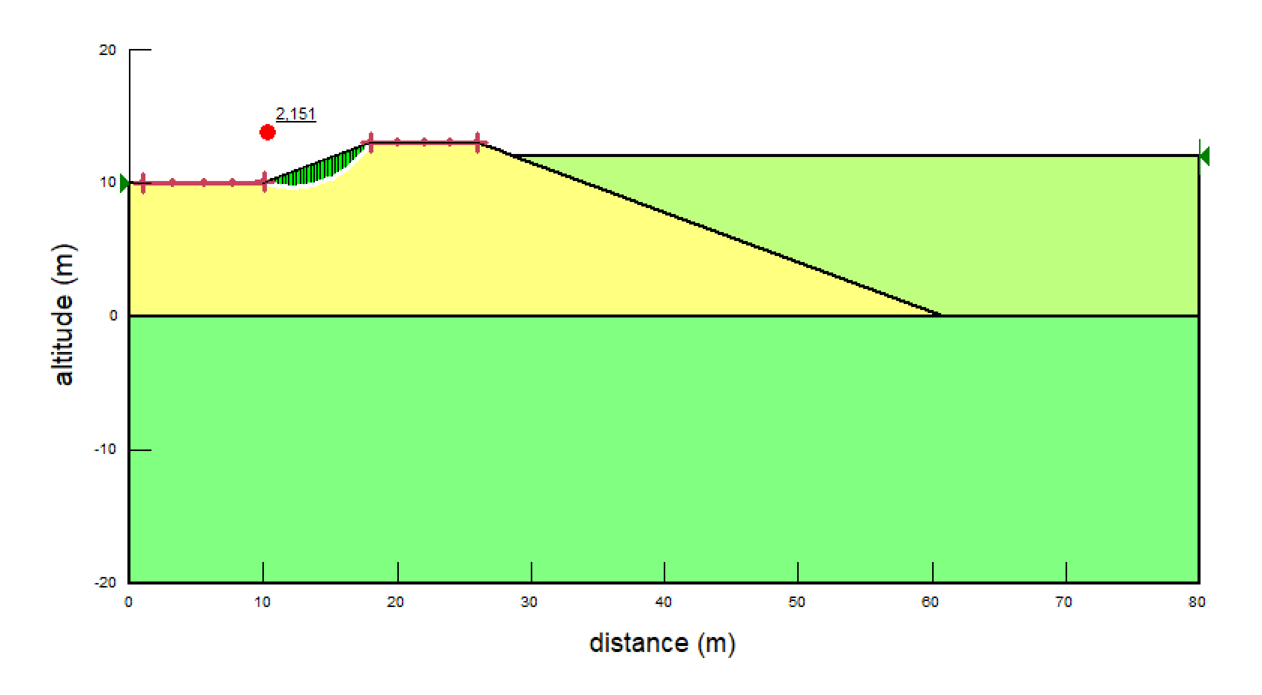




Facteur de sécurité talus amont



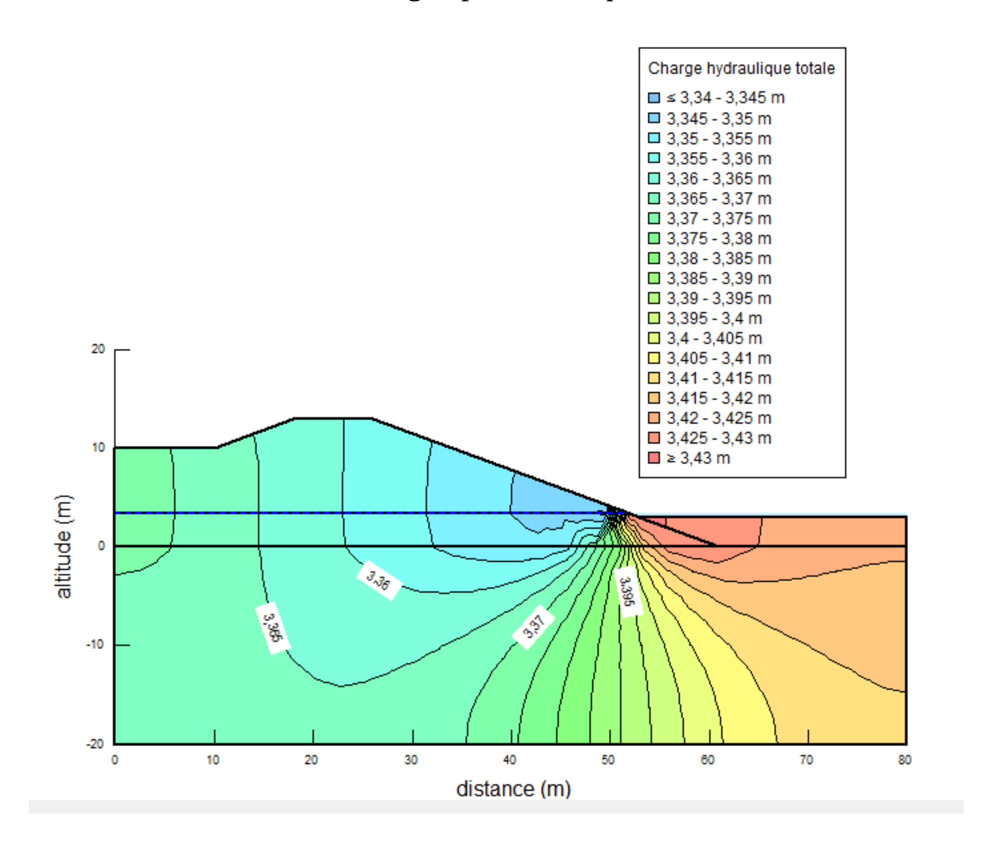
Facteur de sécurité talus aval



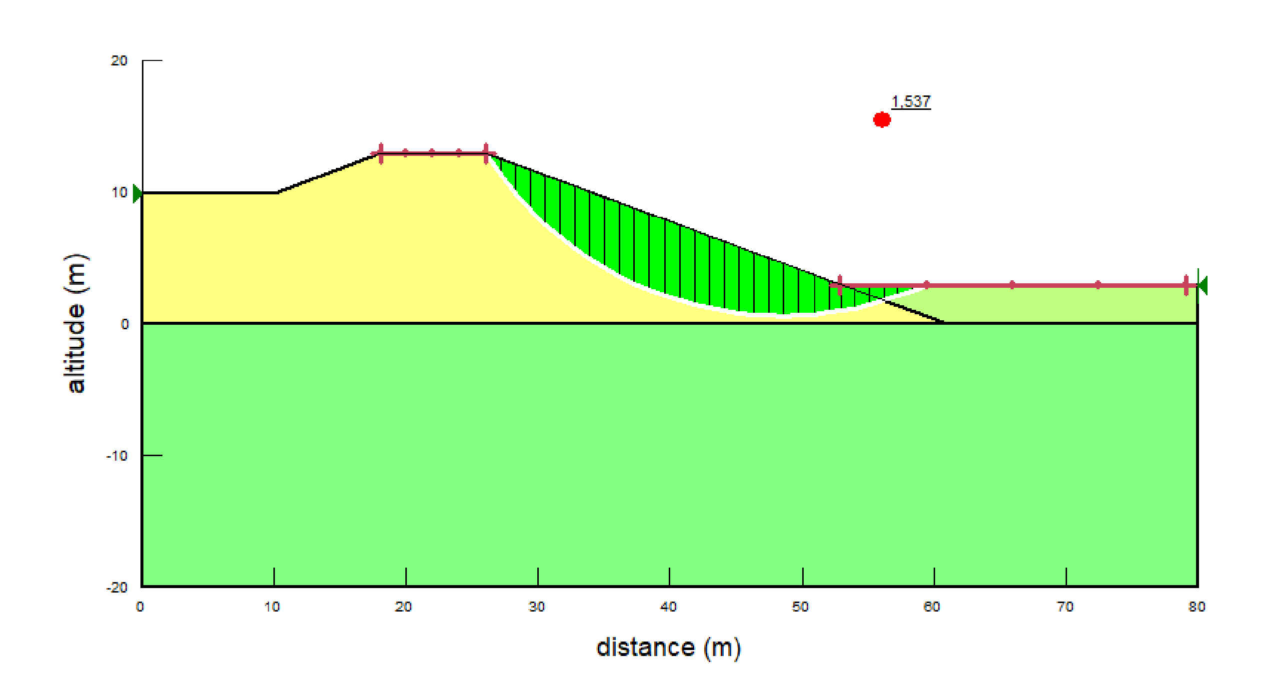


d. Cas Retenue boue à hcritique =3m:

La ligne piézométrique

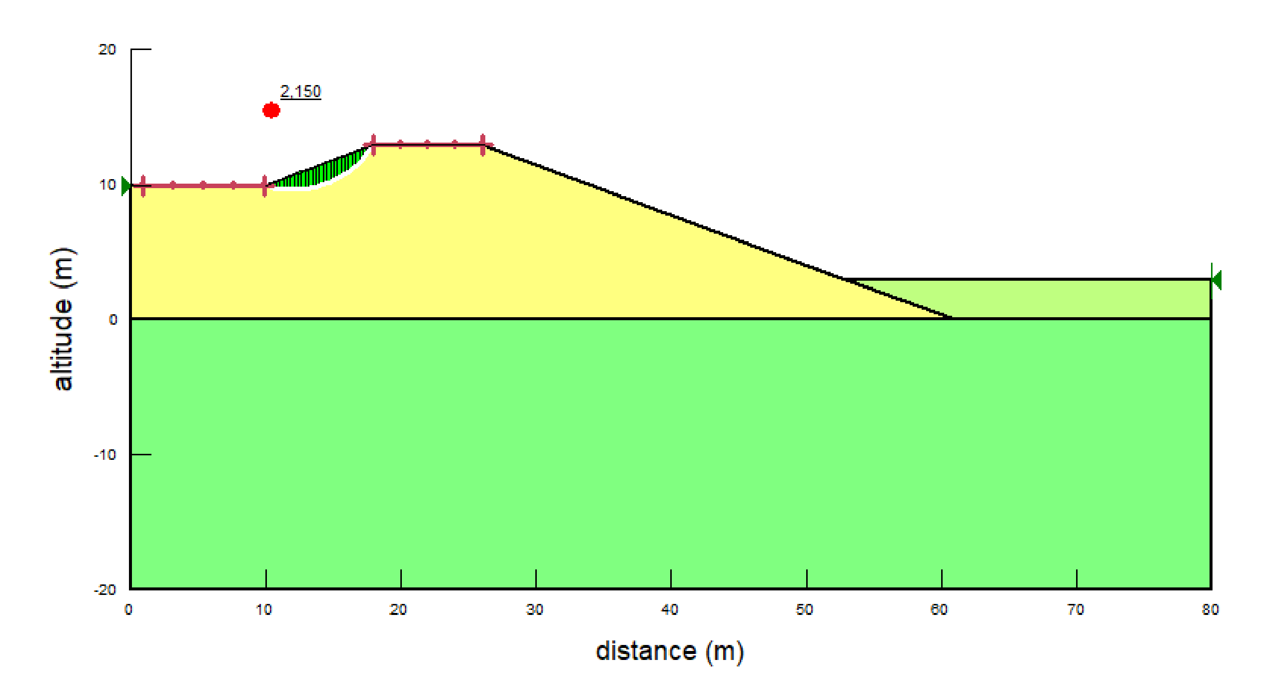


Facteur de sécurité talus amont



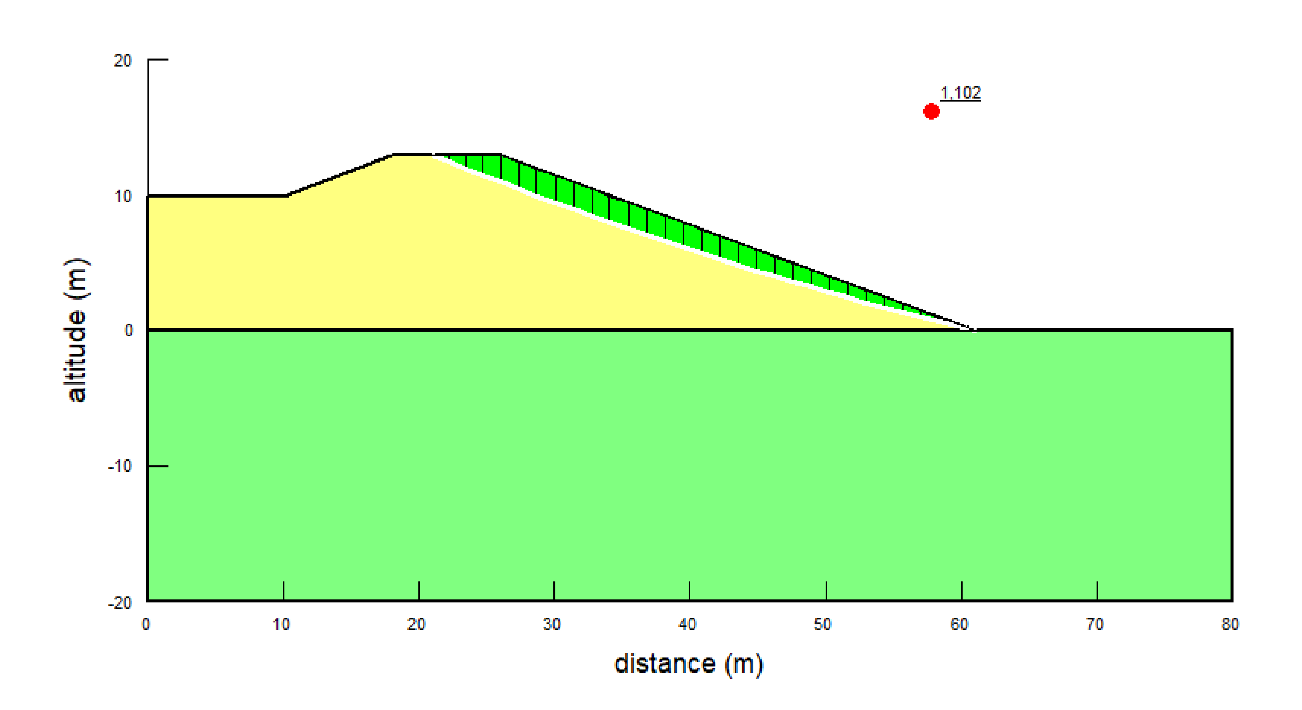


Facteur de sécurité talus aval



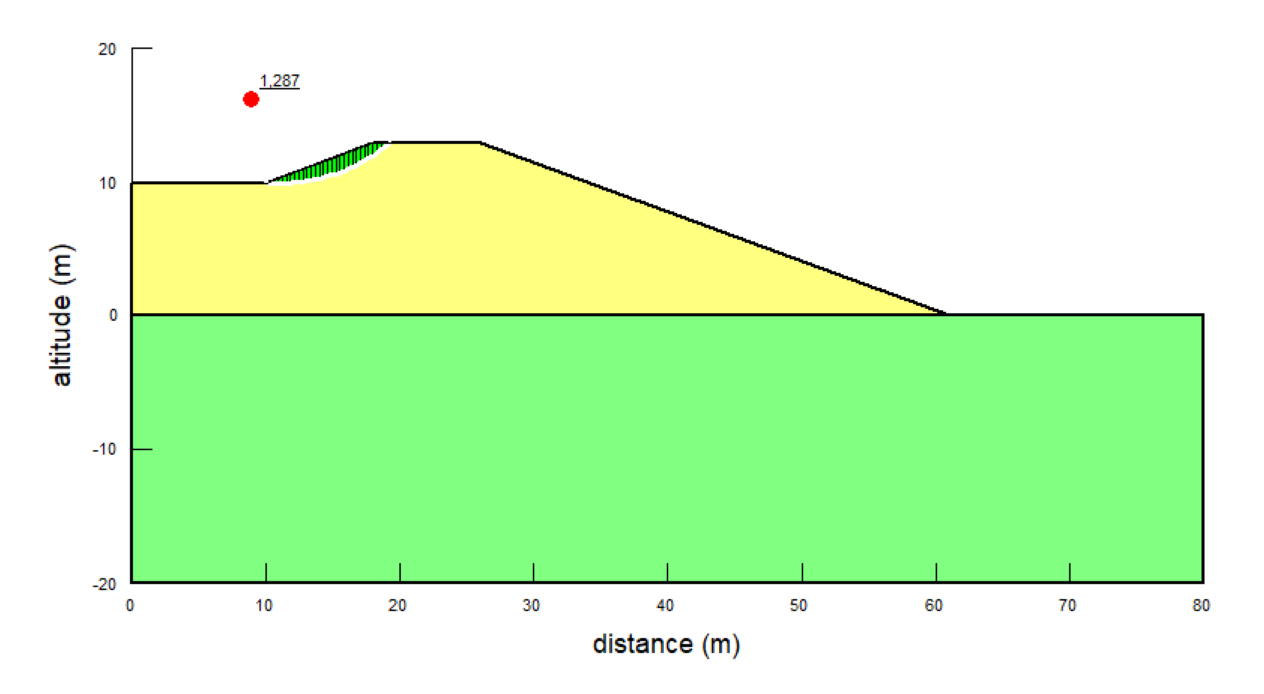
e. Cas sismique retenue vide:

Facteur de sécurité talus amont



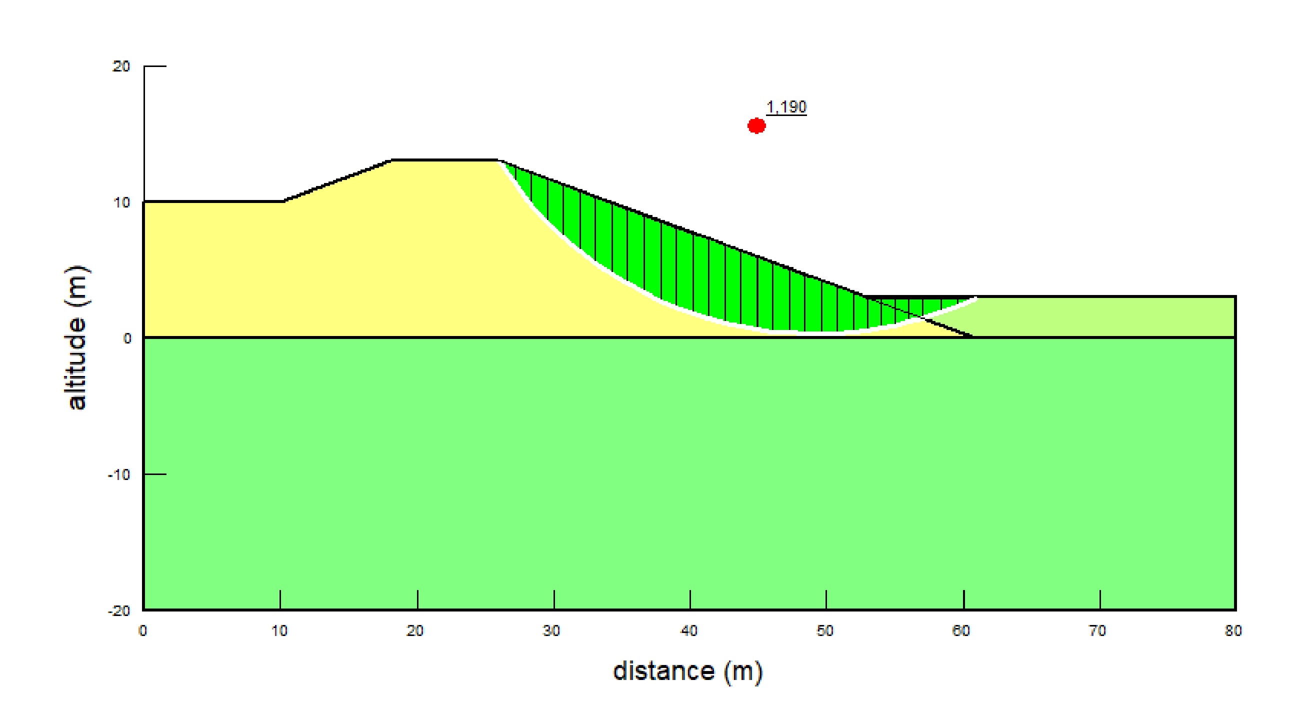


Facteur de sécurité talus aval



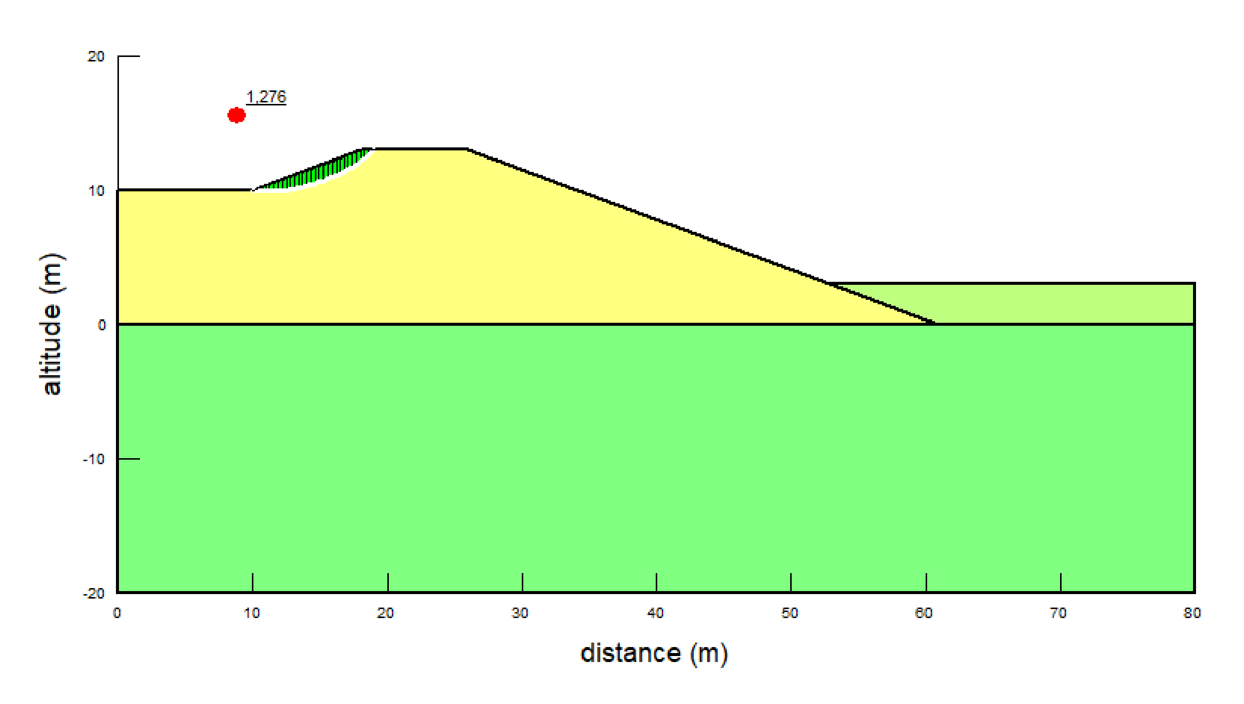
f. Cas sismique retenue de boue à $h_{critique}$ =3m :

Facteur de sécurité talus amont





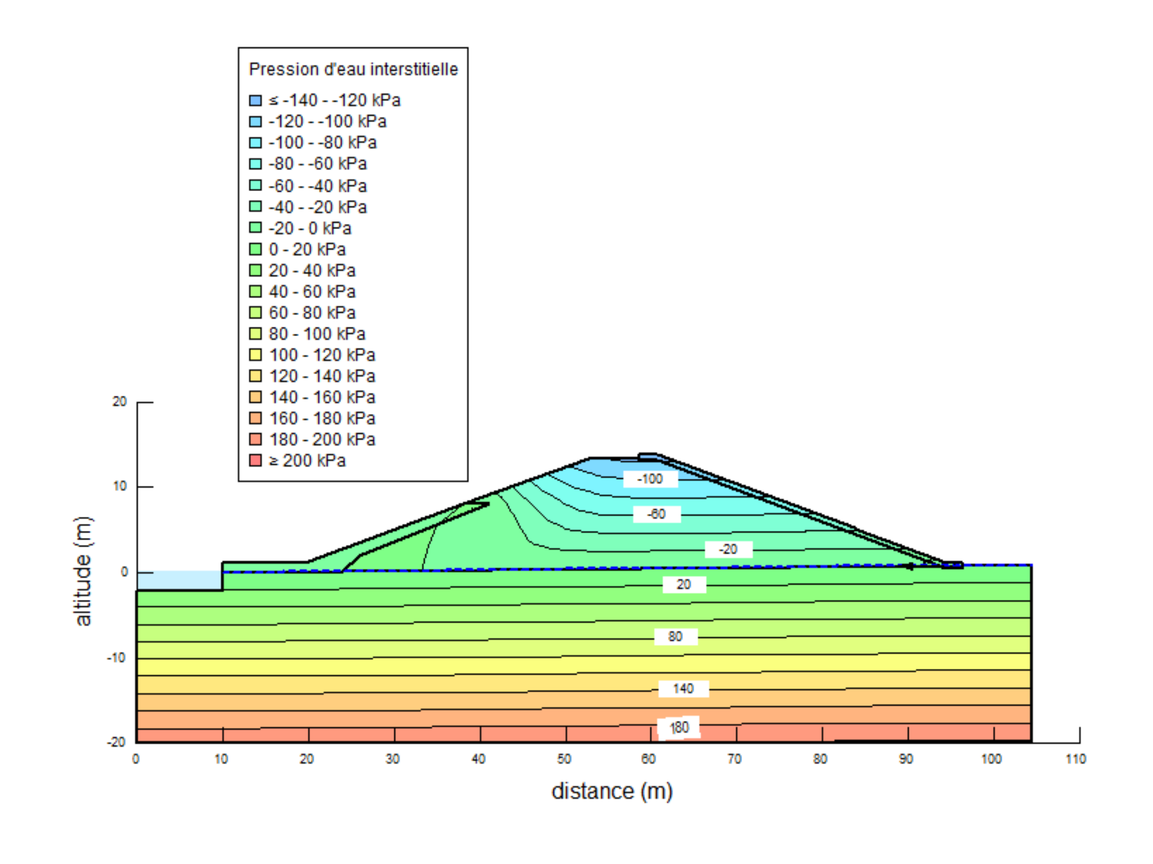
Facteur de sécurité talus aval



2. Résultats de stabilité du profil dimensionnant Sud:

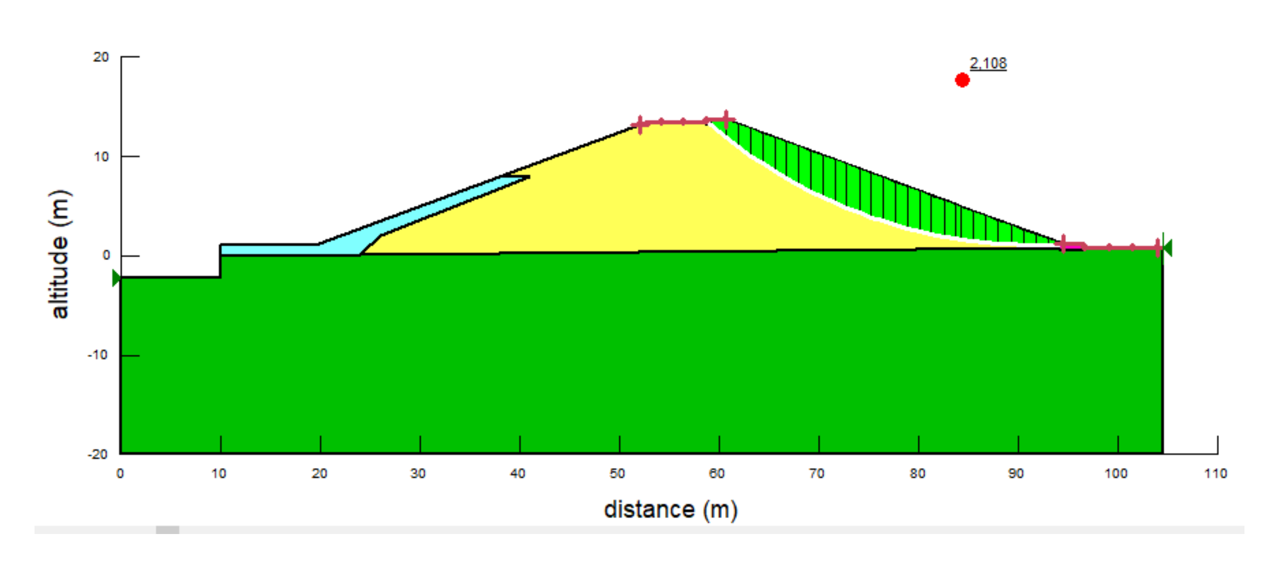
a. Cas Fin de construction :

La ligne piézométrique

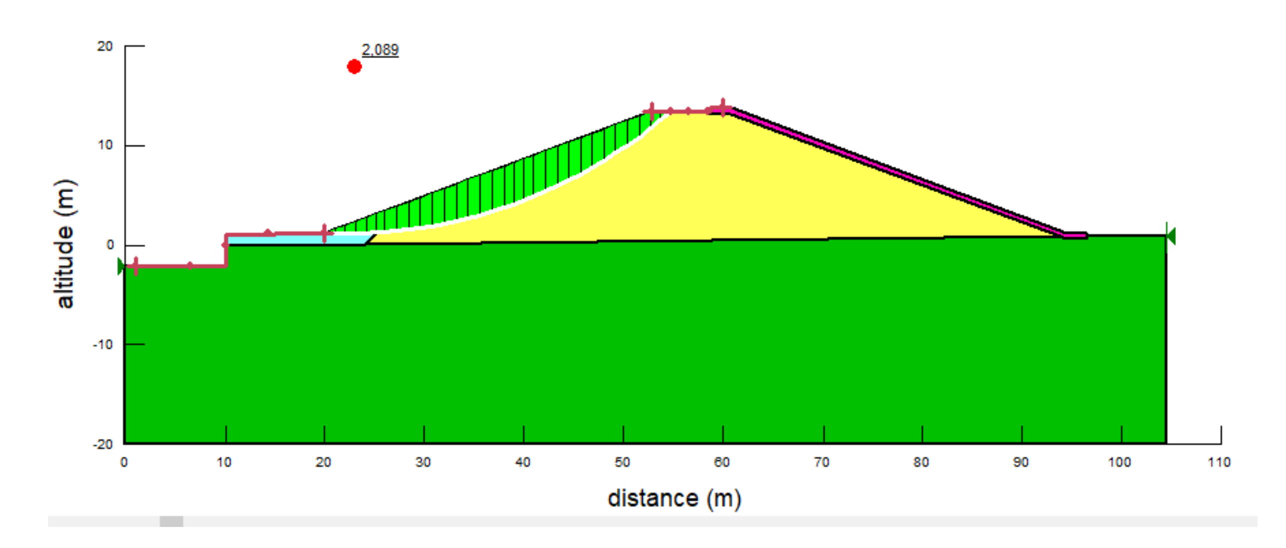




Facteur de sécurité talus amont



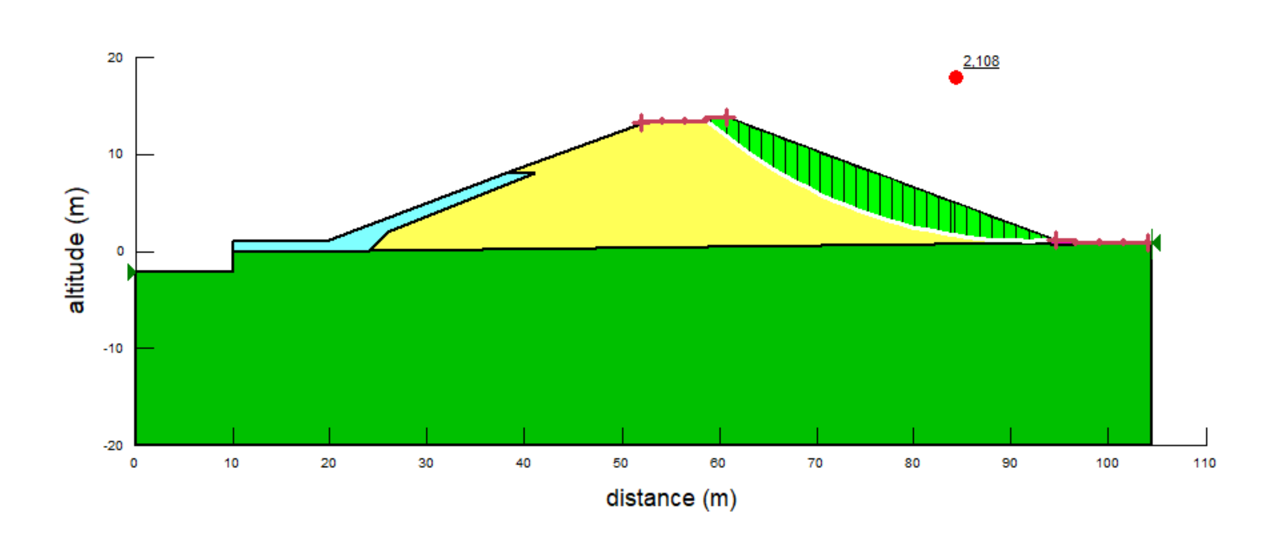
Facteur de sécurité talus aval



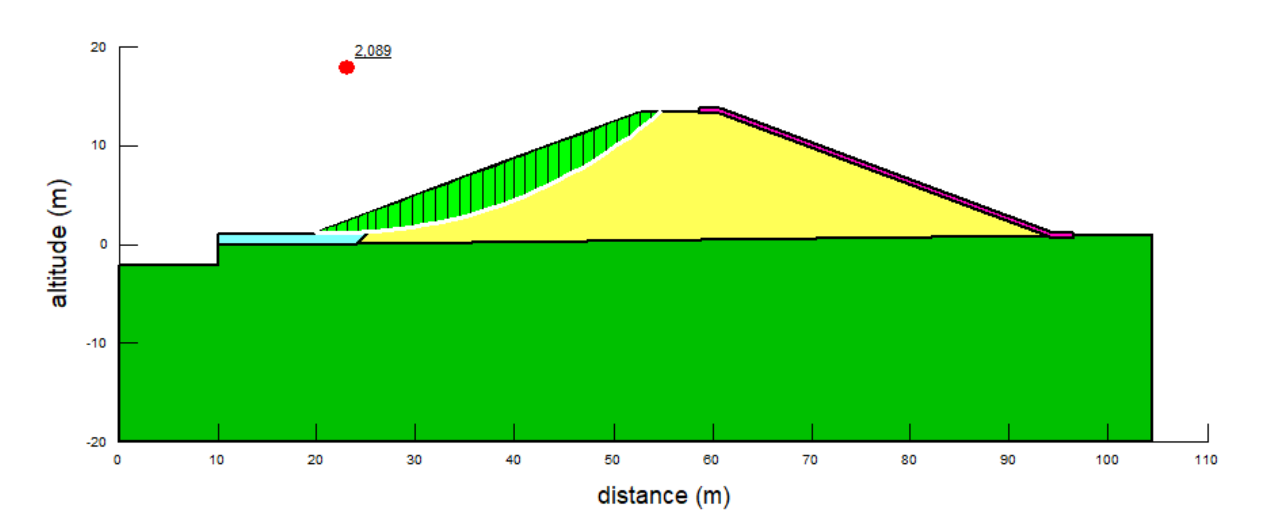


b. Cas Retenue vide:

Facteur de sécurité talus amont



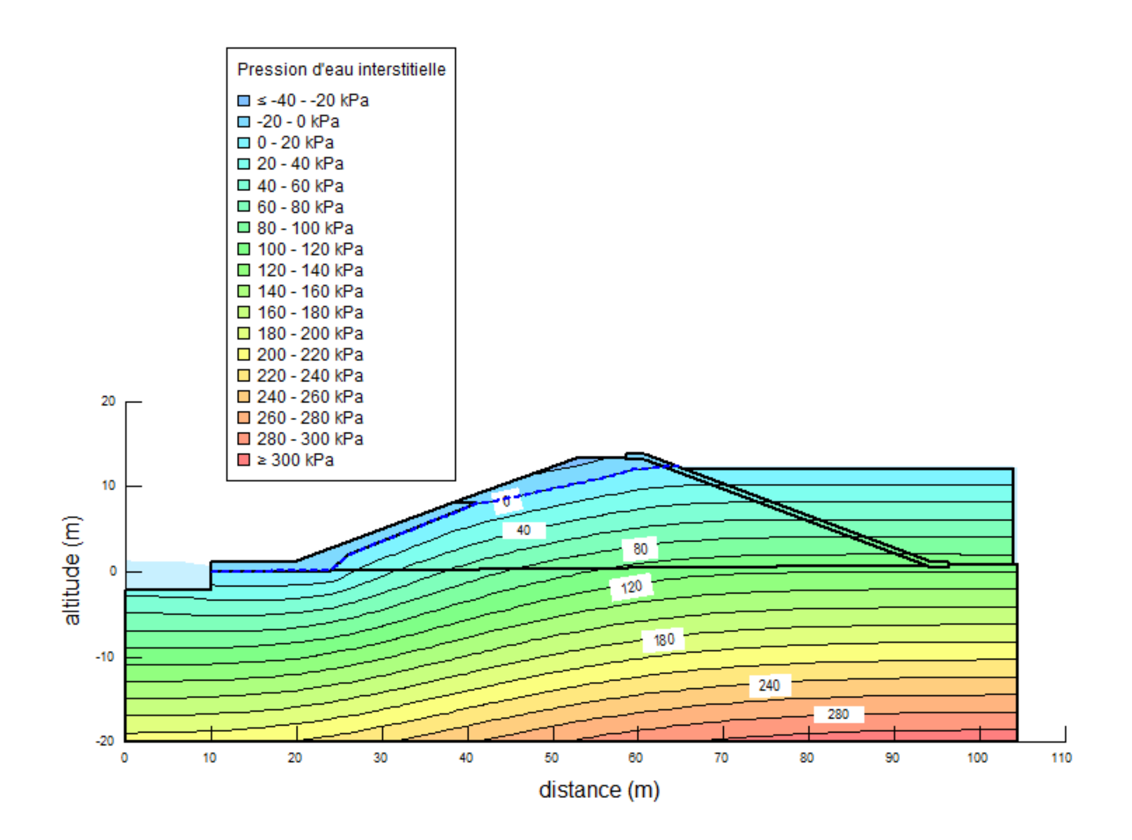
Facteur de sécurité talus aval



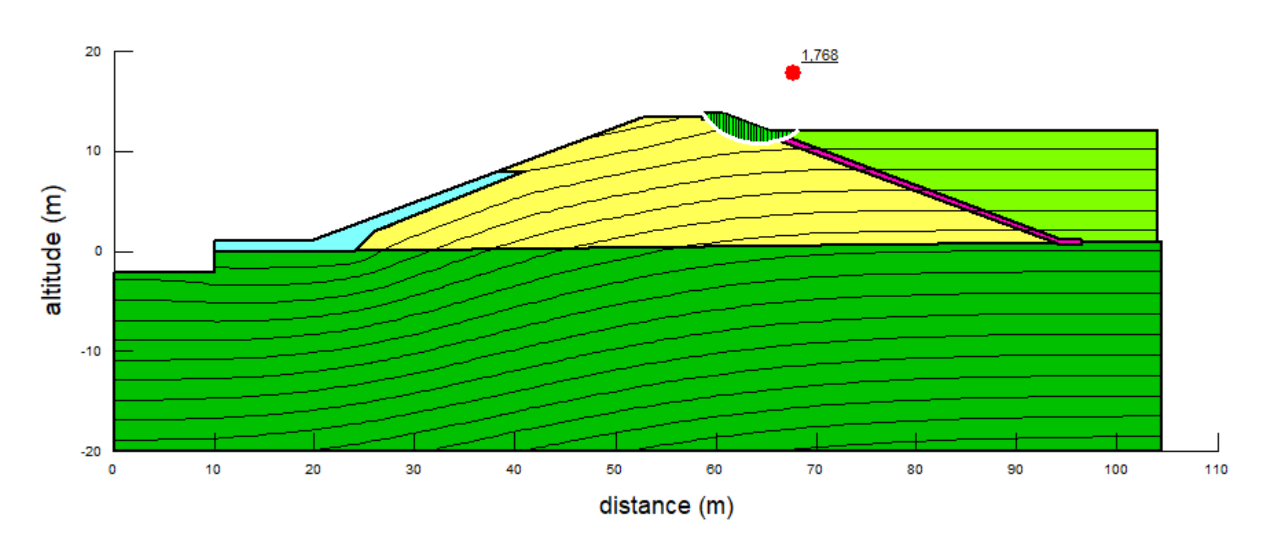


c. Cas Retenue remplie à $h_{critique}$= 12m :

La ligne piézométrique

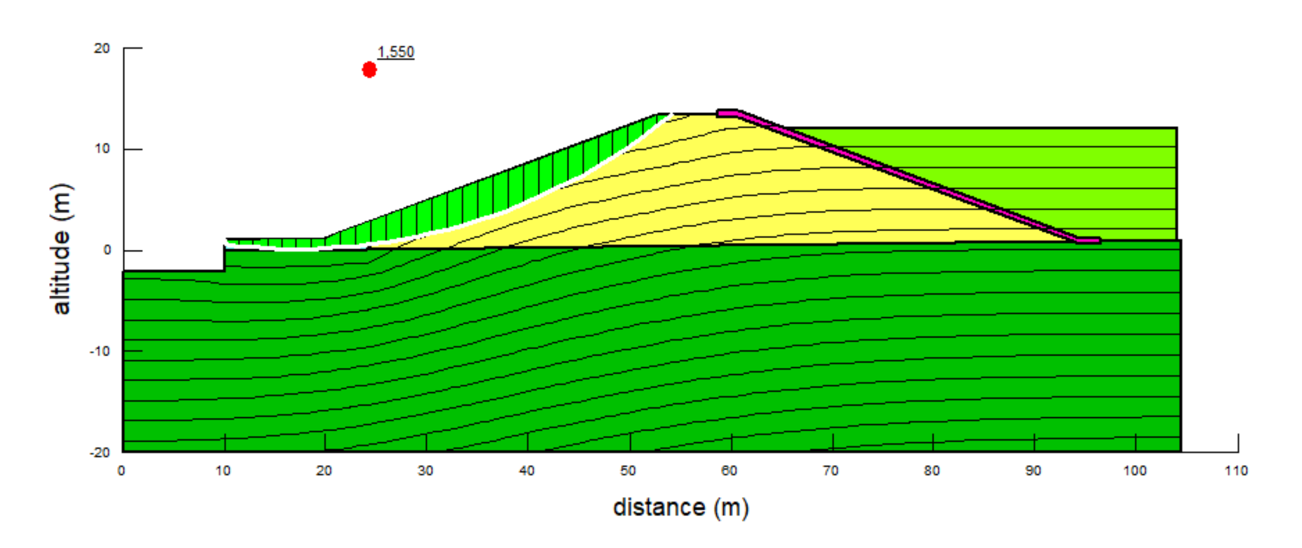


Facteur de sécurité talus amont



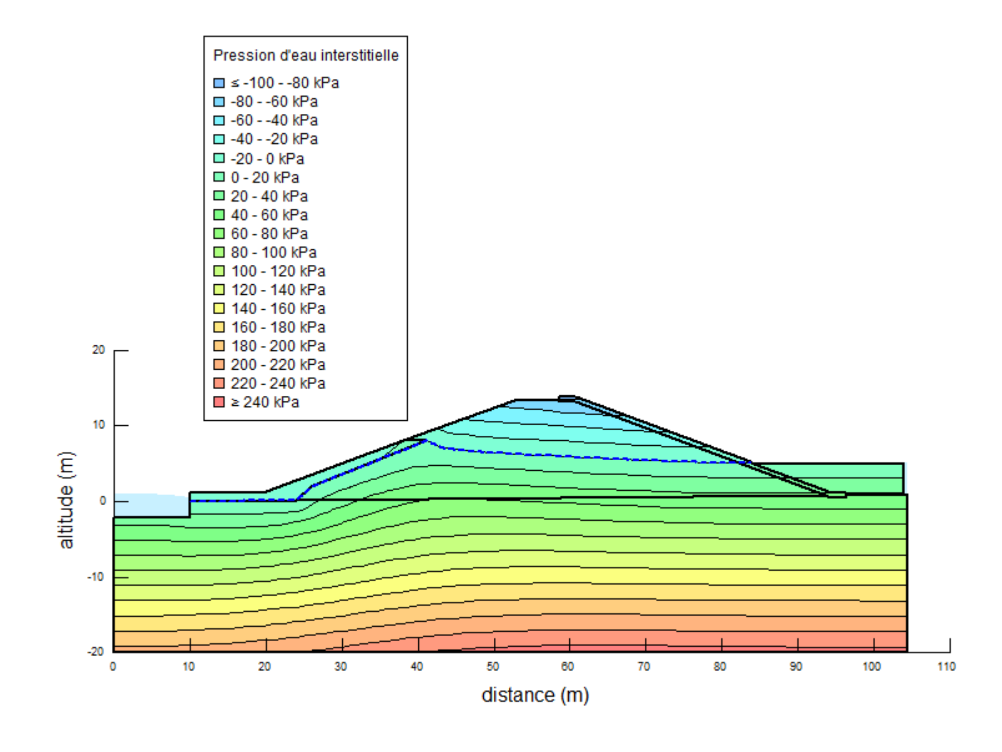


Facteur de sécurité talus aval



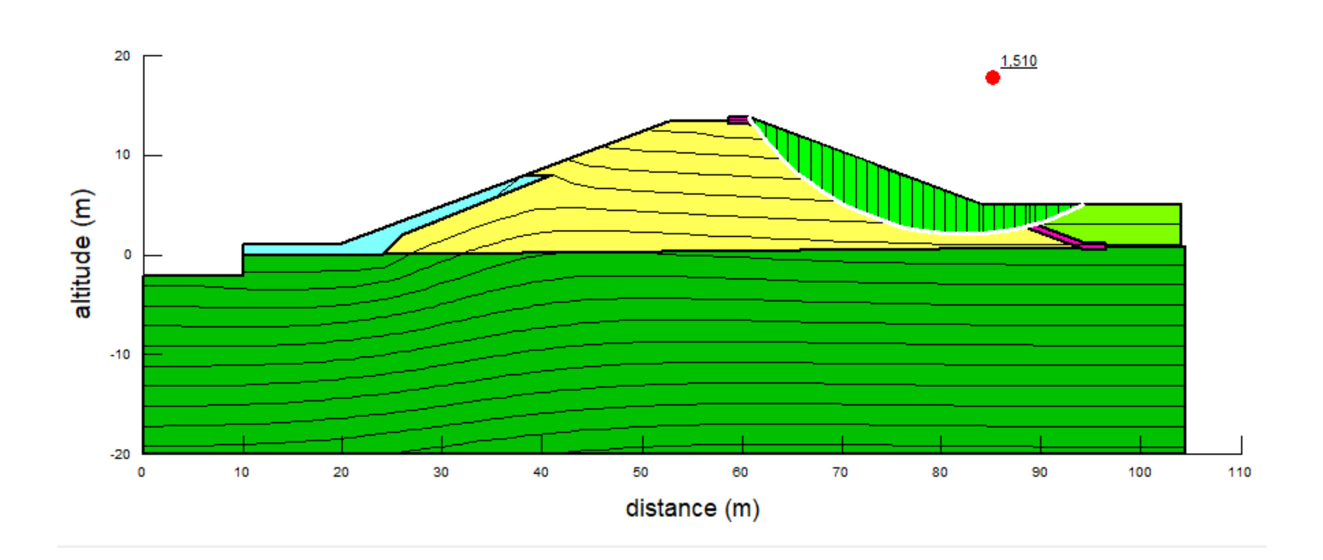
d. Cas Retenue remplie à $h_{critique}$=5m :

La ligne piézométrique

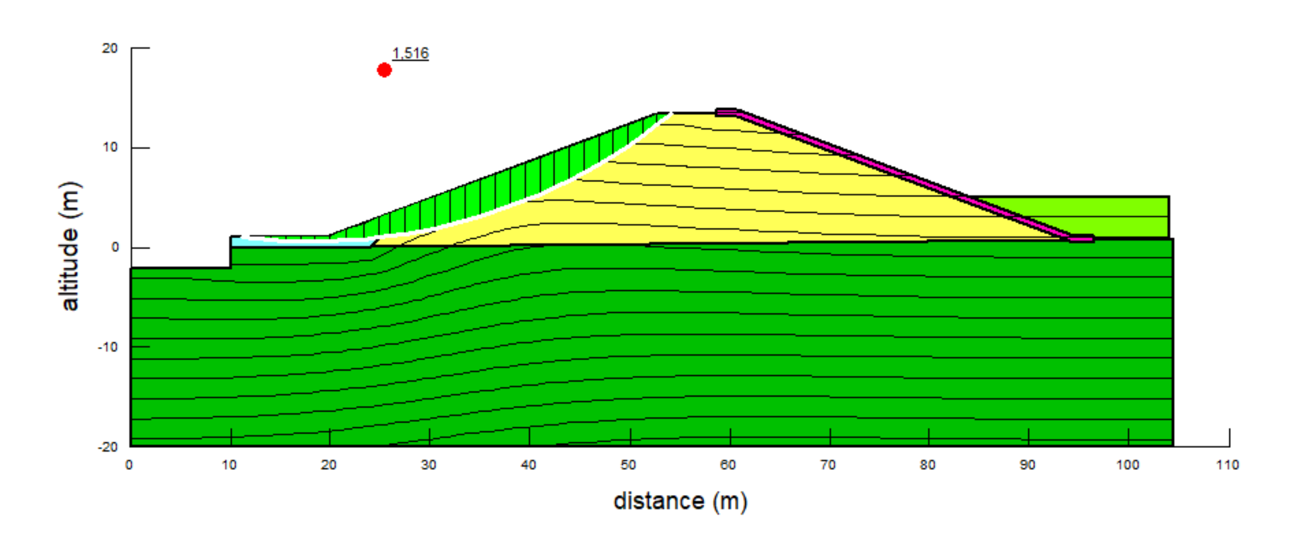




Facteur de sécurité talus amont



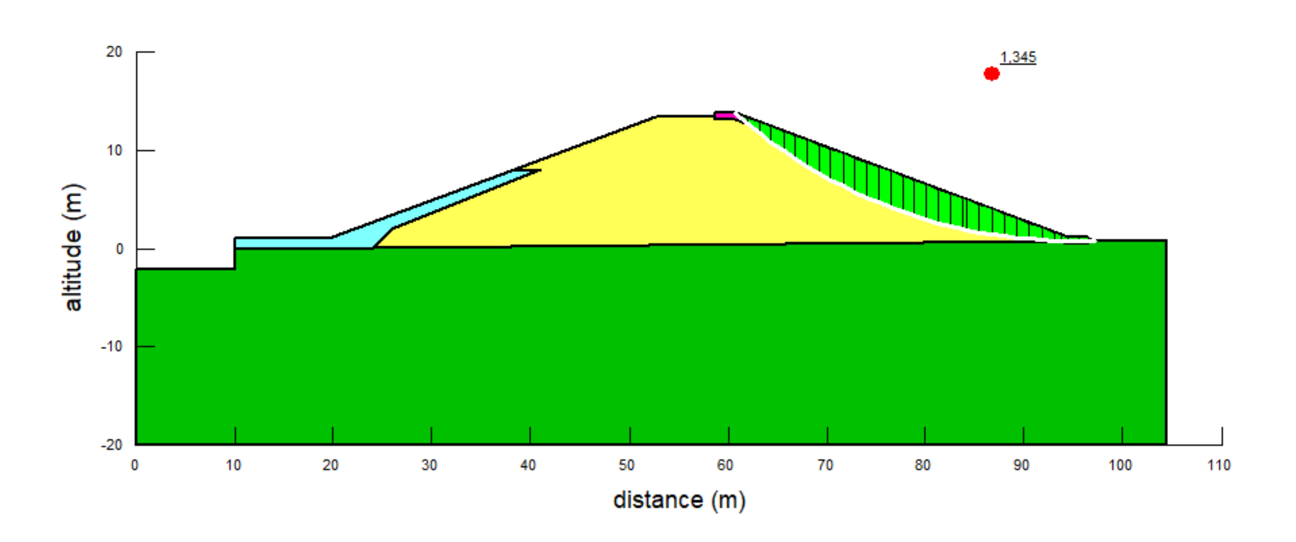
Facteur de sécurité talus aval



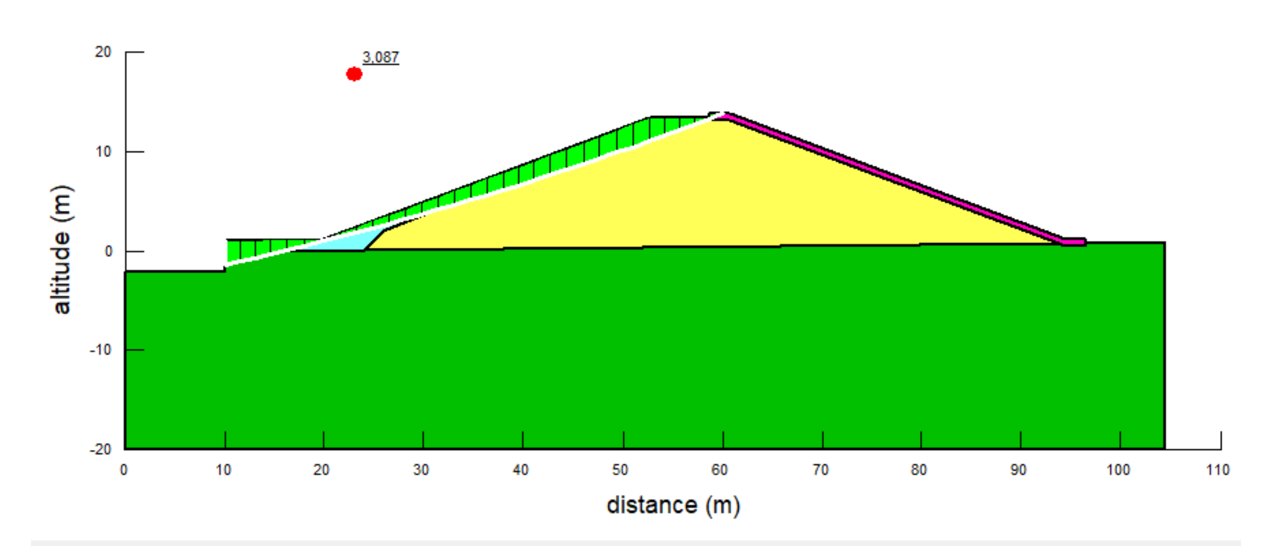


e. Cas sismique retenue vide :

Facteur de sécurité talus amont



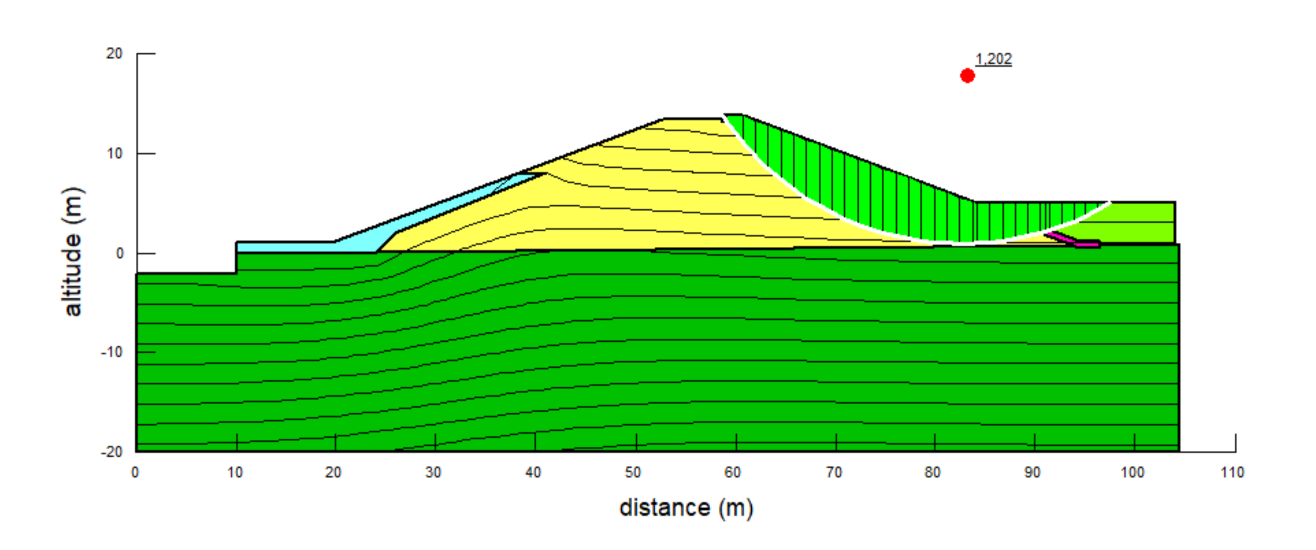
Facteur de sécurité talus aval



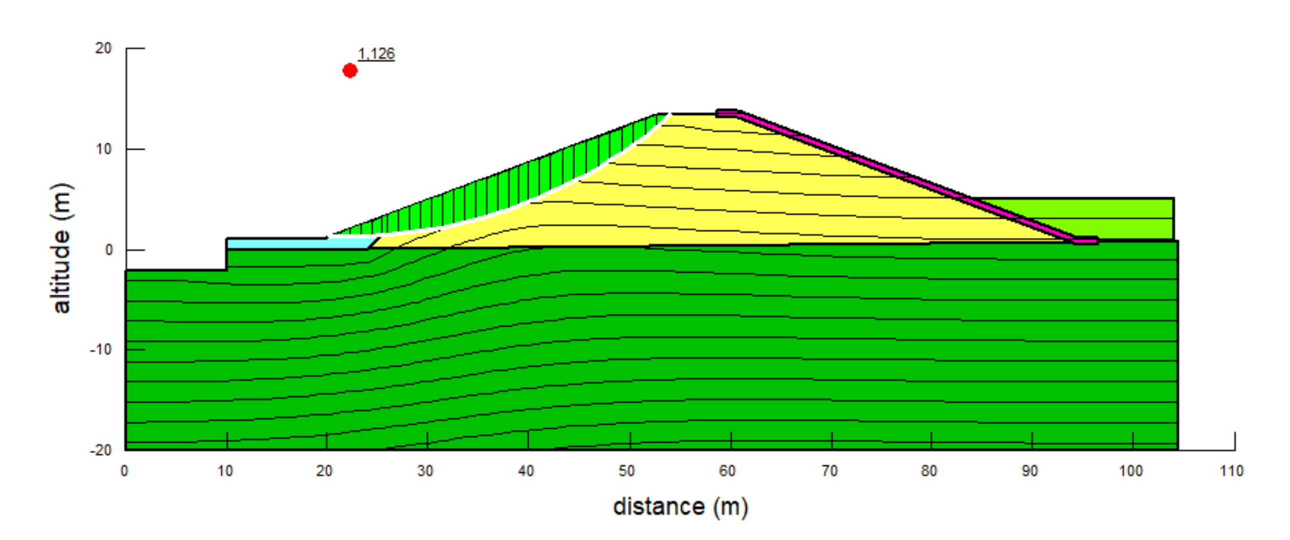


f. Cas sismique retenue $h_{critique}$=5m :

Facteur de sécurité talus amont

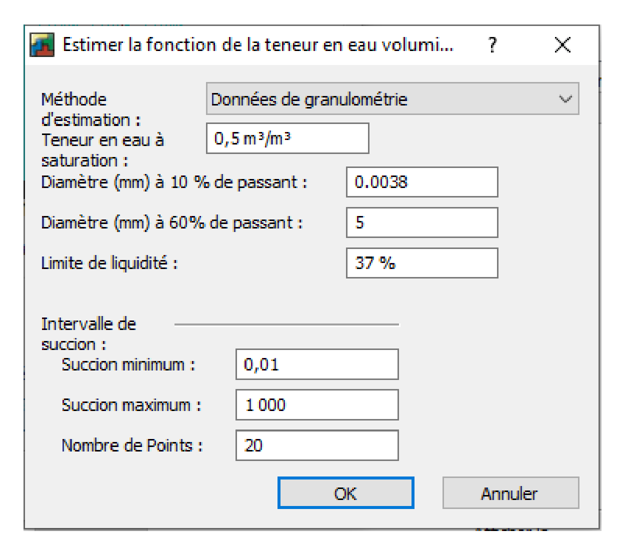


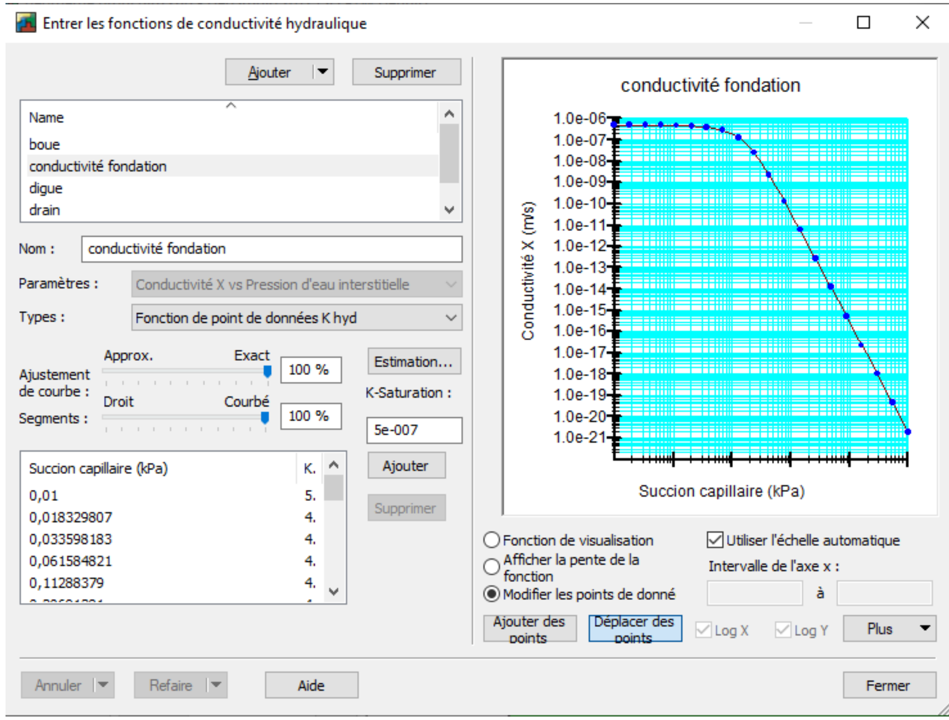
Facteur de sécurité talus aval



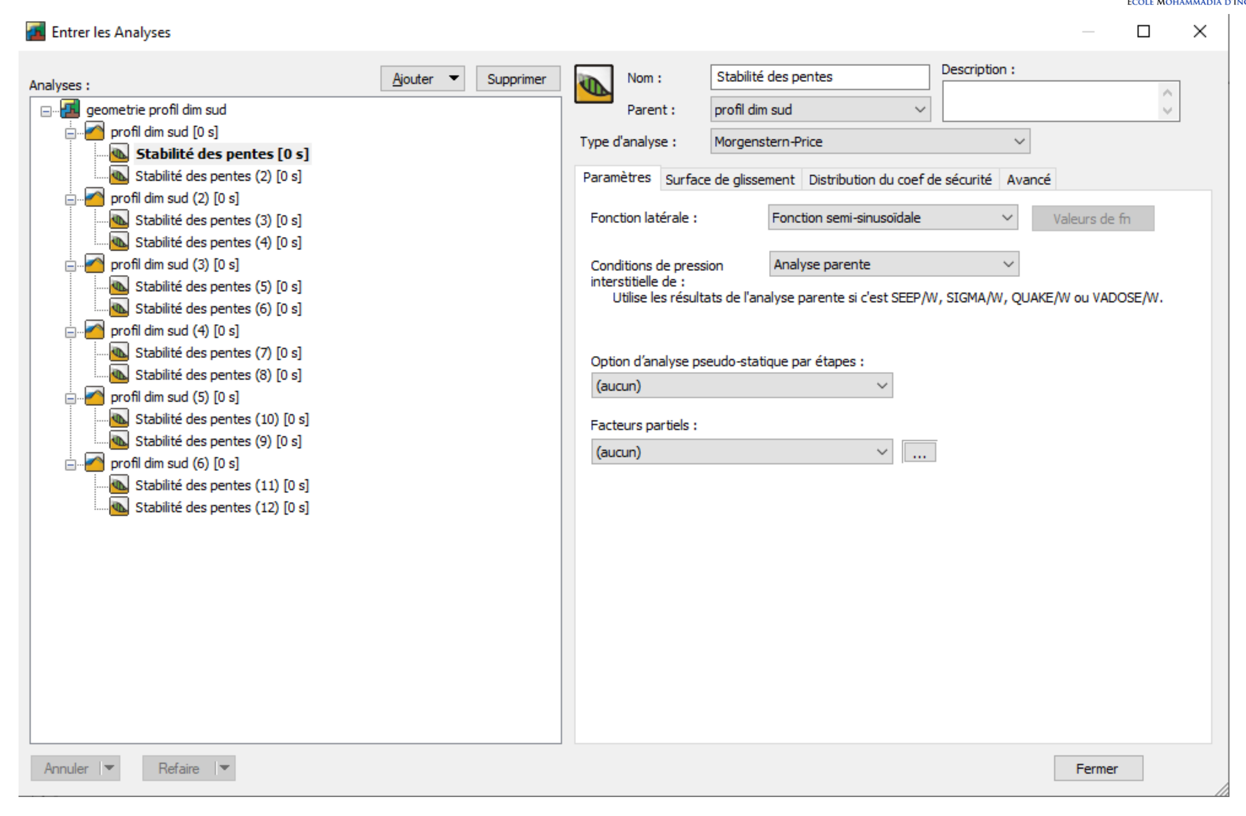


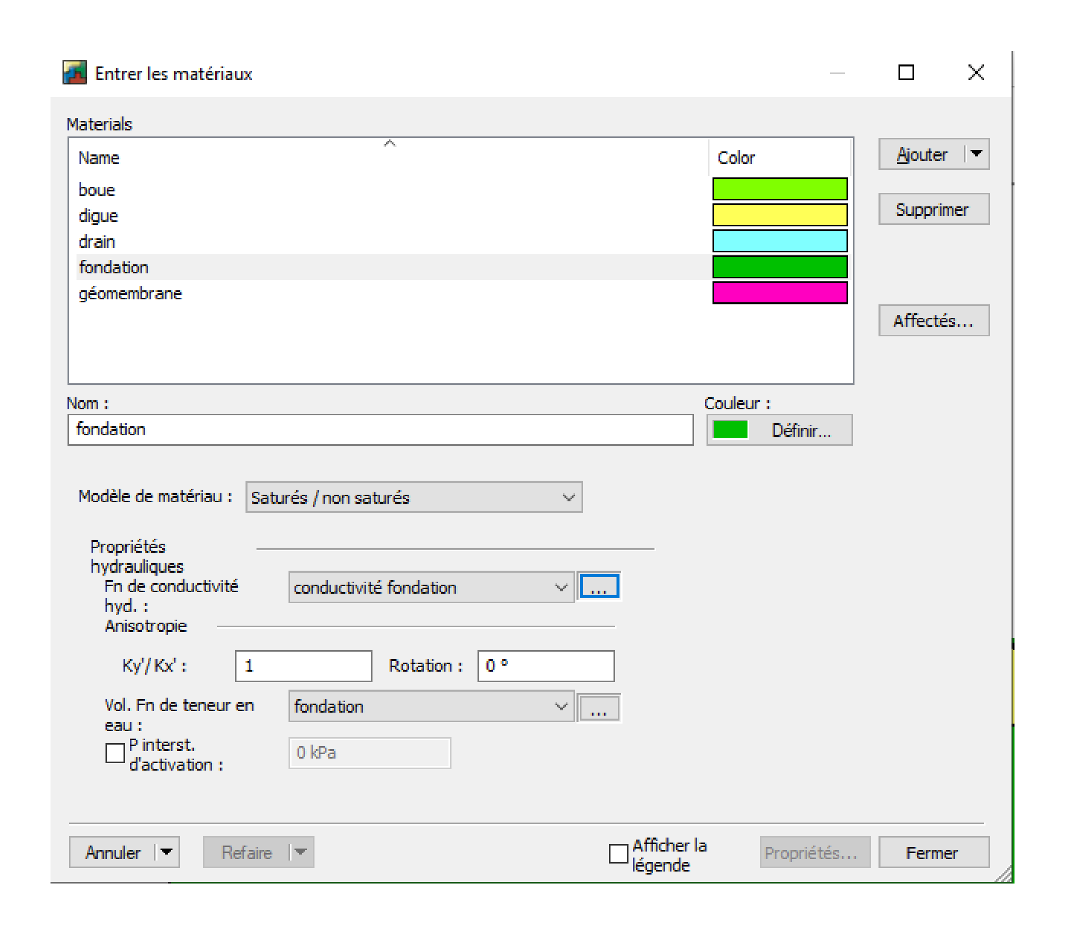
g. Les données de SEEP/W pour avoir la ligne piézométrique






ECOLE MOHAMMADIA D'INGÉNIEURS


Entrer les Analyses
Analyses :
Ajouter
Supprimer
geometrie profil dim sud
profil dim sud [0 s]
Stabilité des pentes [0 s]
Stabilité des pentes (2) [0 s]
profil dim sud (2) [0 s]
Stabilité des pentes (3) [0 s]
Stabilité des pentes (4) [0 s]
profil dim sud (3) [0 s]
Stabilité des pentes (5) [0 s]
Stabilité des pentes (6) [0 s]
profil dim sud (4) [0 s]
Stabilité des pentes (7) [0 s]
Stabilité des pentes (8) [0 s]
profil dim sud (5) [0 s]
Stabilité des pentes (10) [0 s]
Stabilité des pentes (9) [0 s]
profil dim sud (6) [0 s]
Stabilité des pentes (11) [0 s]
Stabilité des pentes (12) [0 s]
Nom : Stabilité des pentes
Parent : profil dim sud
Description :
Type d'analyse : Morgenstern-Price
Paramètres
Surface de glissement
Distribution du coef de sécurité
Avancé
Fonction latérale : Fonction semi-sinusoidale
Valeurs de fn
Conditions de pression interstitielle de : Analyse parente
Utilise les résultats de l'analyse parente si c'est SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W ou VADOSE/W.
Option d'analyse pseudo-statique par étapes : (aucun)
Facteurs partiels : (aucun)
Annuler
Refaire
Fermer


Entrer les matériaux
Materials
Name
Color
boue
digue
drain
fondation
géomembrane
Ajouter
Supprimer
Affectés...
Nom : fondation
Couleur :
Définir...
Modèle de matériau : Saturés / non saturés
Propriétés hydrauliques
Fn de conductivité hyd. : conductivité fondation
Anisotropie
Ky'/Kx' : 1
Rotation : 0 °
Vol. Fn de teneur en eau : fondation
P interst. d'activation : 0 kPa
Annuler
Refaire
Afficher la légende
Propriétés...
Fermer



3. Organigramme pour le calcul d'une section rectangulaire d'une poutre en flexion simple à l'état limite ultime

